



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA,
BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

NUEVAS REDES DE AGUA PARA CIUDADES CON ESCASEZ HÍDRICA: UN
ACERCAMIENTO DESDE LA OPTIMIZACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

DANIELA FRANCESCA GORMAZ CUEVAS

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DÍAZ ALVARADO

PROFESOR COGUÍA:
J. CRISTIAN SALGADO HERRERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANA LUCÍA PRIETO SANTA
GUILLERMO VALENZUELA VENEGAS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por ANID, Proyecto FONDECYT N°
11170042

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERÍA CIVIL QUÍMICA
POR: Daniela Francesca Gormaz Cuevas
FECHA: 27 de julio de 2020
PROFESOR GUÍA: Felipe Díaz Alvarado

NUEVAS REDES DE AGUA PARA CIUDADES CON ESCASEZ HÍDRICA: UN ACERCAMIENTO DESDE LA OPTIMIZACIÓN

La escasez de agua es un problema para muchos países, donde se espera que se agudice el difícil acceso al agua potable y su saneamiento. Chile no es una excepción, presentando diversas características que acentúan la desigualdad hídrica generando zonas con escasez.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar una red de agua mediante un modelo de optimización, que minimice impactos económicos y ambientales, utilizando nuevas fuentes de agua para regiones con escasez hídrica, en particular, Antofagasta y Atacama.

Las regiones previamente descritas se caracterizaron para establecer los parámetros del problema y analizar la situación de cada una. Así, fue posible estudiar las tecnologías utilizadas actualmente en el tratamiento de agua potable y servida. Se representó la red actual como un grafo, para luego agregar nuevas fuentes alternativas y crear la superestructura del modelo de optimización. Las nuevas fuentes corresponden a agua de mar, agua lluvia y agua servida (o reciclada). Fue necesaria la investigación de las tecnologías utilizadas para el tratamiento de estas nuevas fuentes, logrando producir agua potable. Con todo lo anterior, se pudo modelar la red como un problema mixto lineal (*MIP*) sujeto a restricciones económicas, balances volumétricos, aspectos ambientales, entre otras. Una restricción particular es la correspondiente a la barrera humana, que corresponde a la oposición social que tienen las personas para consumir agua reciclada. Esto generó que se plantearan dos escenarios para cada caso de estudio, con distintos niveles de barrera humana: 30 % y 70 %.

Los resultados indican que, si bien el nivel de barrera humana afecta a las soluciones, es posible reciclar en cualquier escenario, pero es importante un análisis del valor de cada consumo, para establecer un reciclaje máximo. Comparando la situación actual de Antofagasta con el caso optimizado, los costos aumentaron en un 50 % y 100 % para el escenario 1 y 2 respectivamente, con flujos de extracción 2 y 3 veces mayor en el escenario 1 y 2, respectivamente. En el caso de Atacama, la extracción de agua aumenta 11 veces más y el costo se eleva en un 250 % aproximadamente, para ambos escenarios. La diferencia entre ambos se debe principalmente a cambios en los porcentajes de las coberturas de las demandas y distribución de consumos. A partir de los resultados en ambas regiones, se espera que en cualquier región puede ser posible la instalación de plantas de reciclaje, plantas de tratamiento de agua lluvia o desalinizadoras, pudiendo generar una matriz hídrica diversificada.

Finalmente, se concluye que el presente modelo puede ser aplicado a otras zonas y que se pueden hacer cambios para mejorar la determinación de parámetros, o incluir otros aspectos no considerados tales como: plantas de tratamiento con calidad de riego, incertidumbre frente a distintos escenarios, etc. Sin embargo, es un precedente que sirve para la toma de decisiones, pudiendo asegurar el abastecimiento de agua mediante diversas fuentes hídricas y pudiendo utilizarse como herramienta para la planificación de largo plazo en el abastecimiento de agua.

Cuando el último árbol sea cortado, el último río envenenado y el último pez pescado, sólo entonces el hombre descubrirá que el dinero no se come.

Proverbio indio.

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mis profesores de comisión. A Cristian y a Ana Lucía por apoyarme y retroalimentarme durante mi trabajo y en distintos puntos de mi carrera estudiantil. A Guillermo, por siempre ayudarme cuando tenía dudas, apoyarme y guiarme en más de lo que fue mi trabajo de memoria. A Felipe, por confiar en mí desde que entré a la carrera, por darme tantas oportunidades (que sólo podía imaginar), por ser más que un profesor guía, por ser un amigo, un mentor, alguien confiable y apasionado por su trabajo, gracias por enseñarme tantas cosas.

A mi familia, por el apoyo y contención que me pudieron entregar siempre, por siempre pensar en mi felicidad y darme las herramientas necesarias para llegar a donde estoy. A mi papá y hermanos, porque aunque tengamos diferencias, sé que me apoyan y me quieren, y es mutuo. Quisiera hacer especial homenaje a las mujeres de mi familia, quienes han sabido sortear las dificultades de su vida con sabiduría y cariño. A mi tía Cecy, por enseñarme de fortaleza y valentía, porque considero que es un ejemplo a seguir, por ser mi segunda madre. A mi abuelita, por siempre mimarme y quererme, por enseñarme la importancia del trabajo constante y la perseverancia. A mi mami, por todo el amor que me da cada día, porque me dio todo lo que tengo, y todo lo que soy es gracias a ella. A mi pareja, Bastian, porque siempre me ha apoyado y creído en mí (mucho más de lo que yo misma he hecho). Por darme todo su amor y comprensión, y porque espero seguir construyendo un camino a su lado.

A mis amigos de plan común por haber hecho que el paso por esos años en la U no fueran tan terribles. A mis amigos de carrera, Talo, Vane, More, Claudio, Dieguito, Cris y Javi, por tantas risas y momentos compartidos, por siempre decirme 'Vo dale, tu podí', por aceptarme tal y como soy. A mi grupo de siempre, Azúcar, MIC y Vegummies: Romi, Franco y Benja, por soportarme y por verme crecer, por confiar en mí y por ser el mejor grupo de trabajo que he podido tener. Al grupo PROSUS, en especial a Jenny, Feña y Javi, por su amistad dada, por siempre acompañarnos en nuestras maratones de estudio de fines de semana y por las conversaciones tan profundas que teníamos.

A mi perrito Garu (a la Linda, Lula, Mono y Chico también), porque no sé que sería mi vida sin animalitos y sin esas travesuras que nos alegran tanto.

Finalmente, gracias a mis profesores de enseñanza media, en especial a Paola Lizama y Mauricio Ramírez, que forjaron desde mis inicios un interés particular por las ciencias y por creer en que podía llegar lejos.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	2
1.1.1. Causas de la escasez hídrica en Chile	2
1.1.2. Sistema regional de gestión de agua	4
1.1.3. Herramientas y optimización	5
1.2. Estado del arte	8
1.3. Impacto del trabajo	9
1.4. Objetivos	10
1.4.1. Objetivo general	10
1.4.2. Objetivos específicos	10
1.5. Alcances y limitaciones	10
2. Plan de trabajo y metodología	11
2.1. Metodología general	11
3. Caracterización de casos de estudio	12
3.1. Metodología específica	12
3.2. Contexto geográfico chileno	12
3.3. Análisis de recursos hídricos	12
3.3.1. Casos de estudio	14
3.3.2. Consumos hídricos	22
3.4. Discusiones	24
4. Sistemas de tratamiento y redes de aguas	26
4.1. Metodología específica	27
4.2. Plantas convencionales de agua	27
4.2.1. Plantas de potabilización (PTAP)	27
4.2.2. Plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)	28
4.3. Nuevas fuentes de agua y su potabilización	29
4.3.1. Desalinización	30
4.3.2. Potabilización de agua lluvia	31
4.3.3. Reciclaje de agua	31
4.4. Plantas actuales	33
4.4.1. Antofagasta	33
4.4.2. Atacama	34
4.5. Tecnologías para plantas nuevas	35

4.5.1.	Desalinización	35
4.5.2.	Tratamiento de Agua Lluvia	37
4.5.3.	Aguas residuales	38
4.5.4.	Costos de plantas de tratamientos	39
4.5.5.	Costos de red de agua	41
4.6.	Discusiones	42
5.	Formulación del problema de optimización	44
5.1.	Metodología específica	44
5.2.	Superestructura	45
5.3.	Modelo matemático	46
5.3.1.	Conjuntos	47
5.3.2.	Restricciones	48
5.3.3.	Parámetros	59
5.3.4.	Funciones objetivo	61
5.3.5.	Metodología programación por metas	62
5.3.6.	Escenarios	62
5.4.	Discusiones	63
6.	Implementación y resolución del problema	66
6.1.	Metodología específica	66
6.2.	Caso de estudio: región Antofagasta	67
6.2.1.	Escenario 1	67
6.2.2.	Escenario 2	70
6.2.3.	Comparación de escenarios	72
6.2.4.	Discusiones	73
6.3.	Caso de estudio: región Atacama	76
6.3.1.	Escenario 1	77
6.3.2.	Escenario 2	79
6.3.3.	Comparación de escenarios	82
6.3.4.	Discusiones	83
6.4.	Discusiones generales de resultados	85
7.	Consideraciones finales	89
8.	Conclusiones	91
	Bibliografía	104
	Anexos	105
	A. Caracterización hídrica y geográfica de Antofagasta	106
	B. Caracterización hídrica y geográfica de Atacama	110
	C. Datos para los consumos de las distintas regiones	114
C.1.	Datos para los consumos de la Región de Antofagasta	114
C.2.	Datos para los consumos de la Región de Atacama	115

D. Tecnologías de tratamiento de aguas	118
D.1. Filtración por membrana	118
D.2. Bioreactor de membrana	119
D.3. GAC	120
D.4. Intercambio iónico	120
E. Cálculo de costo de instalación de cañerías - RedCapC	121
F. Costo de instalación de plantas - PlantCapC	123
F.1. Cálculo de costo de instalación de nuevas plantas de reciclaje	123
F.2. Cálculo de costo de instalación de plantas de reciclaje modificadas	129
F.3. Cálculo de costo de instalación de plantas de desalinización	130
F.4. Cálculo de costo de instalación de plantas de potabilización convencional . .	133
F.5. Cálculo de costo de terreno	134
G. Costo de operación de la red -RedOpC	136
H. Costo de operación de plantas de tratamiento - PlantOpC	139
I. Fuentes de agua natural	140
J. Programación por metas	144
K. Ubicaciones de nodos	146
K.1. Ubicación nodos Antofagasta	146
K.2. Ubicación nodos Atacama	154
L. Elementos de conjuntos	163
M. Parámetros del problema de optimización	175
M.1. Códigos Matlab para cálculo de diferencia de altura y distancias	176
M.2. Códigos Matlab específicos para Antofagasta	176
M.3. Códigos Matlab específicos para Atacama	182
N. Indicador ambiental	190
Ñ. Resultados de programación	192
O. Códigos de programación	193
O.1. Antofagasta	193
O.2. Atacama	228

Índice de tablas

1.1. Tabla comparativa del trabajo presentado con respecto a las investigaciones estudiadas	9
3.1. Datos de precipitaciones por provincia en Antofagasta.	16
3.2. Principales ríos de Antofagasta	17
3.3. Datos de precipitaciones por estación en Atacama.	19
3.4. Principales ríos de Atacama	21
3.5. Resumen de consumos para cada caso de estudio	23
4.1. Resumen costos de instalación de plantas.	40
4.2. Parámetros finales para costos de terreno	40
4.3. Costos operacionales por planta de tratamiento.	41
5.1. Conjuntos del modelo matemático	47
5.2. Variables para el problema multi-objetivo	48
5.3. Resumen de costos	58
6.1. Tabla con resultados de problemas mono objetivo para el escenario 1 de la región de Antofagasta.	68
6.2. Tabla con resultados de problemas mono objetivo para el escenario 2 de la región de Antofagasta.	70
6.3. Tabla comparativa entre principales resultados de escenario 1, 2 y situación actual para región de Antofagasta.	73
6.4. Tabla con resultados de problemas mono objetivo para el escenario 1 de la región de Atacama.	77
6.5. Tabla con resultados de problemas mono objetivo para el escenario 2 de la región de Atacama.	80
6.6. Tabla comparativa entre principales resultados de escenario 1, 2 y situación actual para región de Atacama.	83
A.1. Cuencas hidrográficas de la Región de Antofagasta.	109
B.1. Cuencas hidrográficas de la Región de Atacama.	112
C.1. Población por comuna en la Región de Antofagasta según CENSO 2017. . .	115
C.2. Población por comuna en la Región de Atacama según CENSO 2017.	116
F.1. Resumen de costos de instalación de distintas tecnologías necesarias para el reciclaje de agua. MUSD se refiere a millones de dólares.	124

F.2. Valores de CEPCI obtenidos de bibliografía.	124
F.3. Tabla costos instalación desalinizadora	131
F.4. Costos de terreno para la región de Antofagasta	134
F.5. Costos de terreno para la región de Atacama	135
F.6. Parámetros finales para costos de terreno	135
L.1. Elementos de conjunto fuente natural	163
L.2. Elementos de conjunto consumo domiciliario	164
L.3. Elementos de conjunto consumo industrial	165
L.4. Elementos de conjunto consumo agrícola	166
L.5. Elementos de conjunto recolección para Antofagasta	167
L.6. Elementos de conjunto recolección para Atacama	168
L.7. Elementos de conjunto distribución para Antofagasta	169
L.8. Elementos de conjunto de distribución para Copiapó	169
L.9. Elementos de conjunto distribución para Chañaral y Huasco, Atacama	170
L.10. Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua potable existentes	171
L.11. Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua servida existentes	172
L.12. Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua servida modificadas	173
L.13. Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua servida nuevas	174
L.14. Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua potable nuevas	174
M.1. Otros parámetros para problema de optimización	175

Índice de figuras

1.1.	Aumento de la población en Chile.	3
1.2.	Recursos disponibles versus la extracción del mismo para usos consuntivos.	3
1.3.	Grafo para un sistema regional de agua actual.	4
1.4.	Superestructura del sistema de agua regional con opción de reuso de agua.	7
3.1.	Provincias y subprovincias hidrogeológicas.	14
3.2.	Variación temperatura media anual y precipitación media anual en Antofagasta.	15
3.3.	Hidrografía para la región de Antofagasta.	16
3.4.	Principales ríos para la región de Antofagasta.	17
3.5.	Territorio operacional empresa Aguas Antofagasta S.A.	18
3.6.	Hidrografía para la región de Atacama.	20
3.7.	Principales ríos para la región de Atacama.	20
3.8.	Territorio operacional empresa Aguas Chañar S.A.	21
4.1.	Formación de coágulos y flocúlos mediante adición de químicos.	28
4.2.	Ciclo del agua en hogares.	29
4.3.	Mercado de agua en Singapur.	31
4.4.	Escenarios de tratamiento de reuso para agua potable.	32
4.5.	Proceso de desalación de La Chimba y Taltal.	34
4.6.	Proceso de potabilización en Aguas Chañar S.A.	35
4.7.	Proceso de desalinización para plantas nuevas.	36
4.8.	Técnicas para la captación de agua lluvia.	37
4.9.	Proceso estándar de potabilización de agua.	37
4.10.	Diagrama de flujos de proceso de reciclaje de agua.	38
5.1.	Grafo actual de un sistema regional de red de agua.	45
5.2.	Grafo con nuevas opciones de tratamiento de agua y nuevas conexiones.	46
6.1.	Grafo representativo de la situación actual de la región de Antofagasta.	67
6.2.	Curva de Pareto para problema multi-objetivo de la región de Antofagasta con escenario 1.	68
6.3.	Curva de Pareto parcial para problema multi-objetivo de la región de Antofagasta con escenario 1.	69
6.4.	Grafo para situación optimizada de la región de Antofagasta para escenario 1.	70
6.5.	Curva de Pareto para problema multi-objetivo de la región de Antofagasta con escenario 2.	71

6.6. Curva de Pareto parcial para problema multi-objetivo de la región de Antofagasta con escenario 2.	71
6.7. Grafo para situación optimizada de la región de Antofagasta para escenario 2.	72
6.8. Curvas de Pareto parciales de escenarios 1 y 2 contrapuestos para la región de Antofagasta.	74
6.9. Curvas de Pareto parciales de escenarios 1 y 2 contrapuestos para la región de Antofagasta.	74
6.10. Ejemplificación para disminución en distancia recorrida utilizando recolección en comparación con no utilizar.	75
6.11. Grafo representativo de la situación actual de la región de Atacama.	77
6.12. Curva de Pareto para problema multi-objetivo de la región de Atacama con escenario 1.	78
6.13. Curva de Pareto parcial para problema multi-objetivo de la región de Atacama con escenario 1.	78
6.14. Grafo para situación optimizada de la región de Atacama para escenario 1.	79
6.15. Curva de Pareto para problema multi-objetivo de la región de Atacama con escenario 2.	80
6.16. Curva de Pareto parcial para problema multi-objetivo de la región de Atacama con escenario 2.	81
6.17. Grafo para situación optimizada de la región de Atacama para escenario 2.	82
6.18. Curvas de Pareto parciales de escenarios 1 y 2 contrapuestos para la región de Atacama.	84
6.19. Ejemplificación para disminución en distancia recorrida utilizando distribución en comparación con no utilizar.	84
6.20. Curva de Pareto para un problema convexo.	86
A.1. Provincias en la región de Antofagasta.	106
A.2. Red hidrométrica de Antofagasta.	107
A.3. Estaciones metereológicas seleccionadas para el análisis de precipitaciones en Antofagasta.	108
A.4. Estaciones metereológicas ubicadas al noreste de El Loa.	108
A.5. Cuencas hidrográficas de Antofagasta.	109
B.1. Provincias en la región de Atacama.	110
B.2. Red hidrométrica de Atacama.	111
B.3. Estaciones metereológicas seleccionadas para el análisis de precipitaciones en Atacama.	112
B.4. Cuencas hidrográficas de Atacama.	113
D.1. Tamaño de partícula para distintos tipo de filtraciones.	118
D.2. Esquema de bioreactor con membrana integrada.	119
D.3. Esquema de bioreactor con membrana externa.	120
D.4. Esquema de un intercambio iónico.	120
F.1. Linealización del costo de instalación de tratamiento primario.	125
F.2. Linealización del costo de instalación de lodos activados.	126
F.3. Linealización del costo de instalación de microfiltración.	127

F.4.	Linealización del costo de instalación de cloración.	127
F.5.	Linealización del costo de instalación de osmosis inversa.	128
F.6.	Linealización del costo de instalación de intercambio iónico.	129
F.7.	Linealización del costo de instalación planta desalinizadora.	132
F.8.	Costo de instalación planta desalinizadora con línea de tendencia polinómica.	132
F.9.	Costo de instalación planta de tratamiento de agua potable convencional.	133
G.1.	Gráfico para linealización del término 2 del costo operacional de redes.	137
I.1.	Puntos de partida de los principales ríos de Antofagasta.	141
I.2.	Puntos de partida de los principales ríos de Atacama.	141
I.3.	Esquema de simplificación de ríos en forma cúbica.	142
I.4.	Esquema de simplificación de ríos en forma cúbica, con parámetros de altura, ancho y largo de la fuente.	142
I.5.	Simplificación de las rutas de los principales ríos de Antofagasta.	143
I.6.	Simplificación de las rutas de los principales ríos de Atacama.	143
J.1.	Curva de pareto para un problema multi-objetivo con dos funciones.	144
K.1.	Ubicación de los nodos en la región de Antofagasta.	147
K.2.	Ubicación de los nodos PTAP existentes (EP) en la región de Antofagasta.	148
K.3.	Ubicación de los nodos PTAS existentes (EW) en la región de Antofagasta.	149
K.4.	Ubicación de los nodos PEAP existentes en la región de Antofagasta.	150
K.5.	Ubicación de los nodos PEAS existentes en la región de Antofagasta.	151
K.6.	Ubicación de los nodos de consumo agrícola existentes en la región de Antofagasta.	152
K.7.	Ubicación de los nodos de consumo industrial existentes en la región de Antofagasta.	153
K.8.	Ubicación de los nodos de consumo domiciliario existentes en la región de Antofagasta.	154
K.9.	Ubicación de los nodos en la región de Atacama.	155
K.10.	Ubicación de los nodos PTAP existentes (EP) en la región de Atacama.	156
K.11.	Ubicación de los nodos PTAS existentes (EW) en la región de Atacama.	157
K.12.	Ubicación de los nodos PEAP existentes en la región de Atacama.	158
K.13.	Ubicación de los nodos PEAS existentes en la región de Atacama.	159
K.14.	Ubicación de los nodos de consumo agrícola existentes en la región de Atacama.	160
K.15.	Ubicación de los nodos de consumo industrial existentes en la región de Atacama.	161
K.16.	Ubicación de los nodos de consumo domiciliario existentes en la región de Atacama.	162

Capítulo 1

Introducción

Desde hace varios años que el agua es considerada un bien escaso, debido a un aumento constante de la población y a una disminución de la disponibilidad desde distintas fuentes [1]. Chile no es una excepción a estos fenómenos, si bien es considerado como privilegiado hídricamente por las numerosas fuentes de agua que posee, existen causas como la heterogeneidad y sobreexplotación del recurso, o la irregularidad en las precipitaciones, que generan regiones con problemas de escasez y acceso al saneamiento del agua [2].

Estos y otros factores justifican que Chile esté entre los 30 países con mayor riesgo hídrico en el mundo para el año 2025 [2], donde el crecimiento sostenido del consumo agudiza el escenario que ya es complejo en el país, debido a que una gran medida de los recursos hídricos se encuentran comprometidos jurídicamente: tienen dueño [2].

Para entender el proceso del agua, es prudente estudiar las dinámicas de las fuentes de agua. Actualmente, las principales fuentes se dividen en cursos superficiales y subterráneos. Las napas subterráneas no han sido estudiadas a fondo, debido a la complejidad de éstas. Ambas fuentes pueden depender de la lluvia, derretimiento de nieve, etc. Así, las causas de la escasez hídrica afectan de distinta forma a las fuentes de agua existentes en el país.

La planificación de los recursos hídricos debe ser prioridad en todos los países, ya que permite gestionarlos y ayuda a generar un desarrollo sostenible en el tiempo, posibilitando el acceso al agua a las generaciones futuras [3]. Esta problemática debe ser abordada en las distintas propuestas de gestión de agua que se están creando a nivel nacional. El agua es uno de los recursos naturales clave para el desarrollo de cada país. Su problema de disponibilidad se sostiene principalmente en la falta de visión territorial y ausencia de revisión legislativa, la que debería ser abordada en las distintas propuestas de gestión de agua que se están creando a nivel nacional [3]. Por este motivo, la planificación de los recursos hídricos debe ser prioridad en todos los países, ya que permite gestionarlos y ayuda a generar un desarrollo sostenible en el tiempo, posibilitando el acceso al agua a las generaciones futuras.

Así, es necesario realizar estudios que busquen planificar y asegurar la disponibilidad de agua para el consumo a través de distintas fuentes y tratamientos, y encontrar la forma óptima

de gestionar el recurso. Estos estudios técnicos pueden ser abarcados mediante herramientas de optimización que serán utilizadas en el presente trabajo.

1.1. Antecedentes generales

1.1.1. Causas de la escasez hídrica en Chile

Diversos estudios han indagado sobre las causas de las escasez hídrica en Chile, entre las que destacan [4] [2]:

- **Irregularidad en los patrones de lluvias [5]:** En Chile se evidencian dos fenómenos climatológicos importantes que dependen de interacciones oceánicas- atmosféricas, en particular de la 'Oscilación del sur': el Niño y la Niña. El fenómeno del Niño ocurre cuando la circulación convectiva se invierte provocando un aumento de temperaturas y de precipitaciones en la zona norte y centro de Chile, pero propicia algunas sequías en la zona austral [6] [1]. Por otro lado, en el fenómeno de la Niña la circulación en condiciones normales se intensifica provocando temperaturas aún más frías en las costas sudamericanas y una disminución de lluvias en la zona central del país, generando sequías en este sector [1]. Ambos fenómenos generan una irregularidad temporal y geográfica en las frecuencias y magnitudes de las lluvias en Chile.
- **Asignación de los recursos:** Relacionado con el Código de Aguas que rige los derechos de agua en Chile [7]. Se promulgó en 1981 y, hasta entonces, ha tenido una reforma y actualización el año 2005. Permite la tenencia de derechos privados y transferibles y limita la regulación del Estado, además de provocar externalidades negativas como contaminación de los acuíferos y mal suministro de los bienes en la sociedad [8]. En esta legislación, se separan los derechos consuntivos y no consuntivos. Al año 2015, 110 cuencas comprometidas se encontraban con una demanda vendida superior a su recarga natural [9]. Esta política de manejo del agua conduce a la escasez.
- **Aumento de la demanda:** Se menciona el aumento en la demanda relacionado con el crecimiento de la población, aunque puede verse influenciado por otros factores como aumento de temperaturas, aumento del número de industrias, entre otros. En la Figura 1.1 se observa un aumento en la población de Chile, aunque con una tasa de crecimiento decreciente [10]. Por otro lado, se tiene una división del agua dependiendo de la industria, donde el 73 % corresponde al sector silvoagropecuario, un 12 % al sector industrial y un 9 % a la minería, donde se espera que el crecimiento de esta última sea de un 200 % para los próximos 25 años [11]. El aumento de la población, incrementará la demanda de agua para consumo potable, generando, además, un alza en la producción de alimentos y productos que suponen un aumento en la demanda de agua en las distintas industrias. [11].

Gráfico: Evolución de la población y tasa de crecimiento intercensal Censos 1960 - 2017

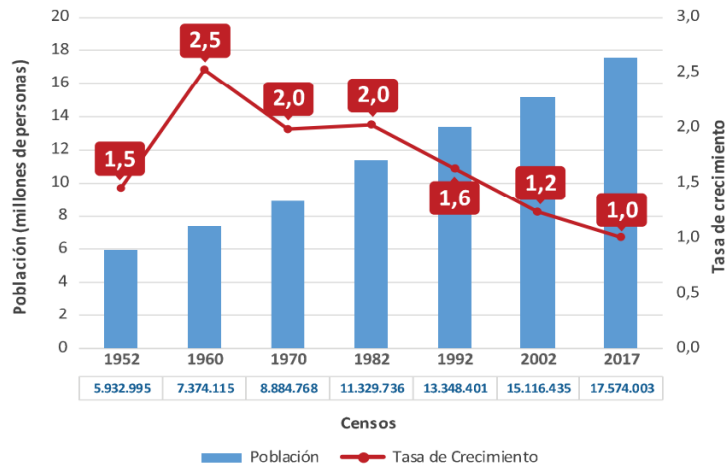


Figura 1.1: Aumento de la población en Chile [10].

- Heterogeneidad en la oferta hídrica:** En el caso de Chile, se tiene un desequilibrio geográfico en cuanto a la localización de los recursos hídricos y la población: Chile es un país con 16 regiones actualmente, pero la mayoría de los estudios se refieren a las 15 regiones administrativas que existían antes del año 2018 [8]. Dichos estudios indican que en el norte y centro del país se concentra el 65% de la población del país y, sin embargo, poseen un rango de escorrentía per cápita que va desde los 45 hasta los 24.000 $[m^3/persona/año]$; mientras que en el sur del país se tiene un rango de escorrentía per cápita entre 24.000 y 3.000.000 $[m^3/persona/año]$ en promedio [1]. La relación entre los recursos disponibles para la extracción y la demanda disminuye de sur a norte, según la Figura 1.2 [8]. Se observa que las regiones con mayor estrés hídrico corresponden a Antofagasta y Atacama.

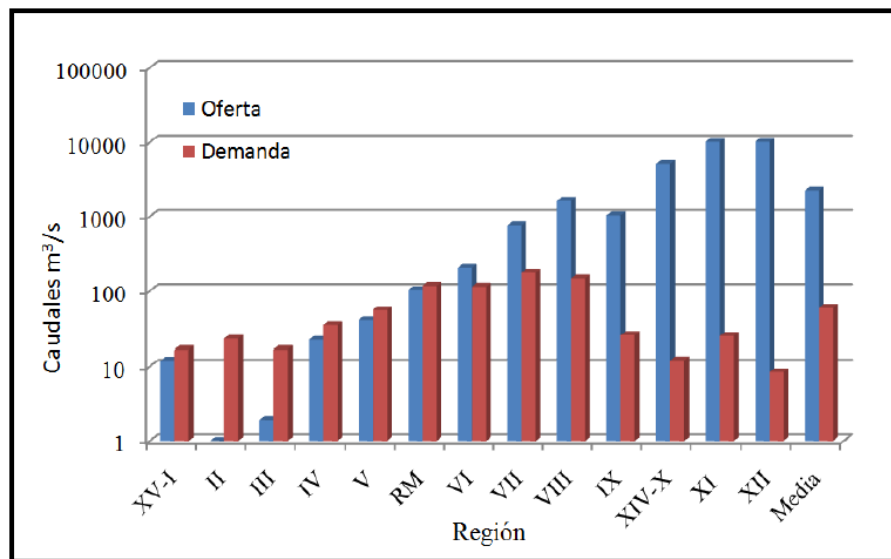


Figura 1.2: Recursos disponibles versus la extracción del mismo para usos consuntivos [8].

1.1.2. Sistema regional de gestión de agua

La gestión del agua se encarga de planificar, desarrollar, distribuir y gestionar la utilización óptima de los recursos hídricos [12]. En este contexto, los principales errores que se cometen son los siguientes [13]:

- **Fragmentación:** Los elementos que componen el sistema de agua se operan de manera independiente y aislada, lo que da origen a externalidades negativas provocadas por decisiones tomadas unilateralmente.
- **Plazos:** En general, la planificación se centra en solucionar problemas de corto plazo a pesar de que las medidas tomadas podrían no ser sustentables a largo plazo.
- **Flexibilidad:** Los sistemas de agua tienden a ser inflexibles en casos de cambios o situaciones extremas, por ejemplo, las plantas de tratamiento o sistemas de cañería se construyen con una capacidad fija.

Así, una región está constituida por ciudades y pueblos, con distintos tipos de consumidores como empresas productivas, personas naturales, consumo en riego, entre otros. Este sistema regional de agua se puede representar a través de una red de agua y simbolizarse de manera visual a través de un grafo, tal como se muestra en la Figura 1.3, donde se observa el recorrido del agua en la red [14]. Un grafo puede adaptarse constantemente y sus elementos se pueden repetir tantas veces como sea necesario para representar el sistema de la mejor manera posible.

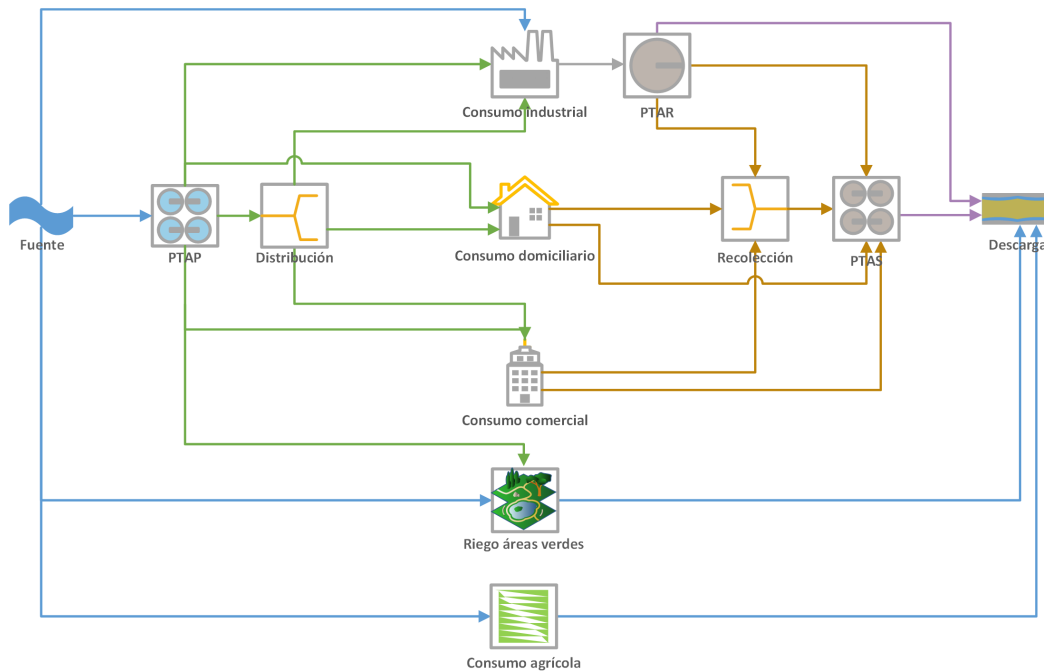


Figura 1.3: Grafo para un sistema regional de agua actual [14].

En términos hídricos, el sistema está compuesto de varios actores (ver Figura 1.3: el agua proviene de una fuente de agua, de donde puede ser extraída para consumo industrial, consumo agrícola, riego de áreas verdes o plantas de potabilización (desde ahora nombradas

PTAP). Luego de potabilizar el agua, es enviada a los distintos consumidores mediante una red de distribución interna o externa. Una vez consumida, el agua contaminada que sale de los nodos de consumo se envía a un sistema de recolección para ser enviada a las plantas de tratamiento de aguas servidas (desde ahora nombradas PTAS). El agua servida se trata y se deja apta para la descarga en cauces superficiales. Cabe destacar que el consumo industrial tiene asociada su propia planta de tratamiento de residuos líquidos (desde ahora nombrada PTAR) [14].

1.1.3. Herramientas y optimización

El problema de determinar la mejor red de agua posible puede ser abarcado a través de un problema de optimización, buscando minimizar o maximizar indicadores sustentables, los cuales sirven como una herramienta de comunicación, que ayuda a orientar la toma de decisiones en torno a un ámbito particular, permitiendo cuantificar el impacto o importancia de uno o más aspectos de la sustentabilidad [15].

La optimización consiste en la selección de una alternativa por sobre las otras, siendo esta mejor en algún sentido [16]. Los problemas de optimización se componen de varias partes:

- **Función objetivo:** Es la variable o medida cuantitativa que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Por ejemplo, minimizar costos de un sistema, maximizar beneficios totales, minimizar impactos ambientales, etc.
- **Variables:** Son las decisiones que se pueden tomar y que afectan el valor de la función objetivo. Ejemplos de variables pueden ser, flujos asociados a un sistema de red de agua, costos de operación, concentraciones de contaminantes, etc.
- **Parámetros:** Se refieren a los datos, factores o medidas conocidas que se requieren fijar para establecer relaciones con variables o con otros parámetros. Por ejemplo, calidades de agua exigidas por ley, capacidades de plantas de tratamiento, demandas de consumidores, etc.
- **Restricciones:** Representan el conjunto de relaciones que algunas variables se ven forzadas a cumplir y se expresan mediante ecuaciones o inecuaciones. Por ejemplo, el cumplimiento de la demanda de los consumidores de cada ciudad, balances de masa, balances de energía, etc.
- **Conjuntos:** Esta sección no es obligatoria de todos los problemas, pero en general ayuda para ordenar parámetros, variables y restricciones. Los conjuntos son aquellas agrupaciones que forman los participantes o nodos de un sistema. Por ejemplo, pueden ser conjuntos los tipos de tratamiento de agua, los tipos de consumo, los tipos de fuentes, etc.

Así, un problema de optimización se puede clasificar de distintas formas:

1. **Programación lineal (*Linear Programming LP*):** las funciones son lineales y se escribe matemáticamente según el siguiente planteamiento normalizado [16]:

$$\min c^T x$$

$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

$$x \in \mathbb{R}^n, c \in \mathbb{R}^n, A \in \mathbb{R}^{m \times n}, b \in \mathbb{R}^m$$

2. **Programación lineal entera mixta (*Mixed Integer Programming MILP*):** las funciones son lineales, pero incluyen variables enteras y continuas. Los problemas se escriben matemáticamente según el siguiente planteamiento normalizado [16]:

$$\min c^T x + d^T y$$

$$Ax + By = b$$

$$x, y \geq 0$$

$$x \in \mathbb{Z}^n, y \in \mathbb{R}^l, c \in \mathbb{R}^n, d \in \mathbb{R}^l, A \in \mathbb{R}^{m \times n}, B \in \mathbb{R}^{m \times l}, b \in \mathbb{R}^m$$

3. **Programación no lineal (*Non Linear Programming NLP*):** las funciones no son lineales, pero son continuas. El problema se escribe matemáticamente según el siguiente planteamiento normalizado [16]:

$$\min f(x)$$

$$g(x) = 0$$

$$h(x) \leq 0$$

$$l \leq x \leq u$$

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

$$g, h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

4. **Programación no lineal mixta (*Mixed Integer Non Linear Programming MINLP*):** las funciones no son lineales y existen variables enteras en el problema. El planteamiento es similar al anterior, y se puede ver en el siguiente planteamiento [16]:

$$\min f(x)$$

$$g(x) = 0$$

$$h(x) \leq 0$$

$$d(x) \leq 0$$

$$l \leq x \leq u$$

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

$$g, h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

$$d : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$$

aproximen lo más posible a algunos niveles de aspiración o ideales, prefijados [20].

1.2. Estado del arte

Existen varios estudios sobre optimización de redes de agua, con distinto énfasis y distintas opciones de tratamiento. A continuación se presentan algunos ejemplos de investigaciones realizadas en el área, para luego comparar los estudios y las diferencias con la presente memoria:

- **Investigación 1: Optimización mixta para la gestión de recursos hídricos, 2011** [21]: Este artículo presenta un enfoque de optimización para la gestión de los recursos hídricos, incluida el agua de mar desalinizada y aguas residuales, aplicado a zonas insulares deficientes de agua. Se propone un problema lineal entero mixto (*MILP*), que divide la isla en 6 regiones para incluir la ubicación de las plantas de tratamiento y la infraestructura de transporte para el agua. Es un problema mono objetivo, donde se minimiza el capital total anualizado y los costos operativos. El resultado muestra la instalación de nuevas plantas de tratamiento de aguas servidas y de desalinización [21].
- **Investigación 2: Optimización multi-objetivo para diseñar y operar sistemas de gestión de agua más sostenibles para una ciudad en México, 2015** [22]: Este artículo propone un modelo de optimización multi-objetivo para el diseño de un sistema de agua de Morelia, México, resolviendo la planificación y programación de las tareas de almacenamiento y distribución de agua. El modelo considera la recolección de agua de lluvia y el reuso de agua como fuentes de agua alternativas, maximizando los ingresos por venta de agua y minimizando el consumo de agua y el uso del suelo. El resultado muestra la instalación de nuevas plantas de tratamiento de agua residual para su reciclaje y el uso de fuentes alternativas, como el agua de lluvia. También se encontró la planificación y programación adecuadas de las tareas de almacenamiento y distribución.
- **Investigación 3: Optimización multi-objetivo para la gestión sostenible del agua para lugares con recursos hídricos sobreexplotados, 2018** [18]: Esta investigación propone utilizar la recolección de agua de lluvia como suministro para lugares con sobreexplotación de recursos hídricos. El modelo está formulado bajo una optimización multi-período y multi-objetivo, donde los objetivos son obtener el máximo beneficio, el mínimo uso de agua subterránea y el costo mínimo de inversión, considerándose un caso de estudio en Querétaro, México. Los resultados muestran que hasta el 27 % de la demanda doméstica podría ser abastecida por agua de lluvia, lo que llevaría a una recuperación significativa de los pozos profundos actualmente en proceso de agotamiento.
- **Investigación 4: Redes de agua sostenibles y resilientes para la adaptación al cambio climático** [14]: Esta investigación pretende utilizar el agua residual para su reciclaje con foco en distintos usos según la calidad (potable, riego, fuente de agua y descarga). El caso de estudio es el Gran Santiago, Chile, donde se modela como un problema multi-objetivo minimizando los costos totales de la red y el impacto ambiental cuantificado mediante el Potencial de Calentamiento Global. Este trabajo sigue en desarrollo y se espera incorporar indicadores de resiliencia y efectos del cambio climático mediante incertidumbre.

2.2.1 Análisis comparativo del estado del arte

En comparación a los problemas abarcados en los estudios anteriores y a las propuestas de solución se puede analizar lo siguiente:

- Las cuatro investigaciones estudiadas intentan dar con distintas soluciones al problema de la escasez hídrica e incluyen aspectos geográficos de las ciudades. En este ámbito, la presente investigación también incluirá inspecciones a la geografía y aspectos climáticos de los casos de estudio.
- La metodología que se utiliza en todos los estudios es similar.
- Las ventajas y desventajas del presente trabajo con respecto a los demás se muestran en la tabla 1.1, donde se destacan como ventajas: i) la utilización de 3 tipos distintos de fuentes de agua, y ii) la utilización de indicadores ambientales y económicos en el problema.

Tabla 1.1: Tabla comparativa del trabajo presentado con respecto a las investigaciones estudiadas

Investigación	Ventaja	Desventaja
1	Se modela como un problema multi-objetivo donde no sólo se toman en cuenta aspectos económicos. También se incluye el agua de lluvia como fuente alternativa.	Los problemas de transporte de agua se caracterizan por expresiones que contienen términos no lineales, como por ejemplo, pérdidas de carga, lo que conllevará a que la presente memoria pueda requerir utilizar herramientas de resolución de problemas no lineales, generando un mayor gasto computacional [23].
2	Se utiliza la desalinización de agua como fuente alternativa.	No se considera la planificación y programación de almacenamiento y distribución.
3	Se utilizan fuentes alternativas de reuso y desalinización.	No considera una optimización multi-periodo.
4	Se utilizan fuentes alternativas de desalinización y tratamiento de aguas lluvias.	No se considera la incertidumbre ligada al cambio climático.

1.3. Impacto del trabajo

La importancia del trabajo recae en poder abarcar un problema global desde la ingeniería de procesos para entregar soluciones sustentables y responsables. Se busca proporcionar una metodología y aplicarla a los casos de estudio, creando lazos importantes entre la sociedad y la ingeniería. También, se espera encontrar las soluciones óptimas de reconfiguración de red de agua, donde es importante la gestión integral del agua considerando diversos indicadores en la planificación del sistema para generar un impacto positivo en la sociedad y medioambiente.

El presente trabajo no se ha aplicado en Chile, por lo que puede ser considerado como antecedente al momento de tomar decisiones.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Crear un modelo de optimización para rediseñar redes de agua enfocado en zonas con escasez hídrica en Chile integrando nuevas fuentes hídricas.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar las zonas geográficas con escasez hídrica en Chile para componer casos de estudio.
2. Caracterizar el uso de agua en los casos de estudio.
3. Investigar sistemas de tratamiento de agua y sus respectivas fuentes.
4. Modelar la red de agua como un grafo.
5. Formular problema de optimización multi-objetivo incluyendo indicadores económicos y ambientales.
6. Resolver el problema para los casos de estudio propuestos.
7. Encontrar la configuración de red de agua óptima para los casos de estudio.

1.5. Alcances y limitaciones

Las limitaciones de la presente memoria son detalladas en los siguientes puntos:

- Se tomarán en consideración localizaciones fijas como posibles ubicaciones de las plantas nuevas, en consideración con la geografía de los lugares, sin embargo, no se considerarán aspectos legislativos como uso de suelo o derechos de aguas existentes. En este sentido, las ubicaciones propuestas serán aproximadas.
- Como se aplicará a casos de estudio regionales, se podrán abarcar un mayor número de personas comparado con una comuna o pueblo, sin embargo, no se consideran detalles como ubicación específica de cada nodo participante en el sistema o distribución actual del sistema de cañerías de agua.
- Sólo se tomarán en cuenta tratamientos para potabilizar el agua, dejando fuera otras calidades que podrían ser de menor costo. Se establece este foco para poner énfasis en el abastecimiento de agua para la población.
- Se considerarán supuestos como cumplimiento de la calidad solicitada o simplificaciones de los costos totales, que afectarán la solución encontrada. Se realizará una justificación y análisis de cada supuesto tomado en el modelamiento del problema.

Capítulo 2

Plan de trabajo y metodología

2.1. Metodología general

La metodología general que se siguió en el presente trabajo se muestra a continuación:

1. Recopilación de datos de casos de estudio: realización de análisis para definir casos de estudio y caracterizarlos según sea necesario.
2. Creación de modelo de superestructura del sistema de agua: para poder visualizar gráficamente la red de agua, donde se consideraron como nodos los distintos tipos de consumo, fuentes, plantas de tratamiento, sumideros y descargas.
3. Decisión de indicadores y definición de parámetros: Para decidir los indicadores se requirió de una investigación previa de qué podría afectar y qué se podría cuantificar, para luego estudiar los parámetros necesarios al componer los indicadores seleccionados.
4. Formulación del problema multi-objetivo e implementación en *GAMS* ®: Luego de tener los indicadores, se formuló de manera matemática, considerando restricciones, variables y parámetros según lo estudiado en las secciones anteriores. Luego de esto, se implementó en *GAMS* solucionando primero los problemas mono-objetivo y luego aplicando la metodología de 'Programación por Metas' al problema multi-objetivo.
5. Resolución y análisis: Luego de resolver el problema en el software mencionado, se analizaron los resultados y se concluyó respecto al trabajo realizado.
6. Escritura del trabajo de memoria de título y corrección de errores.

Además, se siguió una metodología específica para cada sección, que será presentada en los siguientes capítulos para facilitar su comprensión.

Añadido a lo anterior, cada capítulo tiene un apartado de discusiones, para resumir el contenido y analizar los resultados de cada sección.

Capítulo 3

Caracterización de casos de estudio

Antes de comenzar el trabajo, es necesario definir los casos de estudio y caracterizar su situación actual, su contexto geográfico y sus usos de agua. Para esto se seguirá una metodología específica que servirá para poder modelar la red de agua y establecer distintos parámetros característicos de cada región.

3.1. Metodología específica

La metodología para abarcar esta sección requirió los siguientes pasos:

- Se investiga el contexto geográfico de Chile para conocer en términos generales donde están insertos los casos de estudio.
- Una vez caracterizados los casos de estudio, se analiza de manera general y, en particular, los recursos hídricos de cada uno.
- Se investigan las demandas de agua de los casos de estudio. Esto se puede hacer buscando en bibliografía o pidiendo los datos por el Portal de Transparencia. Se utilizan ambas opciones para establecer distintos consumos.

3.2. Contexto geográfico chileno

Chile representa una larga y estrecha franja de tierra con más de 750.000 km^2 de superficie y una longitud cercana a los 4.270 km [24]. Es considerado un país tricontinental debido a su presencia en los continentes Sudamericano, Océánico y el Territorio Chileno Antártico [25]. Esta forma y posición del país tiene ventajas y desventajas como diversidad climática y de ecosistemas, desigualdad de recursos hídricos, etc.

3.3. Análisis de recursos hídricos

La hidrografía chilena presenta características específicas de cada región estudiada, sin embargo, la mayor parte de los ríos nacen de la Cordillera de los Andes y desembocan en el

Océano Pacífico [25]. El clima y el relieve influyen fuertemente en las singularidades de cada sector, generando diferentes caudales y regímenes, así, de acuerdo a las características del escurrimiento superficial en el país, se pueden identificar 3 áreas de escurrimiento [26]:

- **Endorreica:** En la zona norte de Chile, desde el límite con Perú hasta el río Loa, donde la característica fundamental es la permanencia del escurrimiento al interior de la cuenca, sin llegar al mar [25]. Las quebradas o cursos son interminentes y, una vez que salen de la cuenca, son almacenados en un recipiente central, tal como un salar o una laguna [26].
- **Arreica:** En la zona del desierto de Atacama, entre el Loa y Copiapó, son cursos de agua esporádicos y son absorbidos por las grandes extensiones desérticas [25] [26].
- **Exorreica:** Es el tipo de drenaje más difundido en Chile y se asocia a la mayoría del territorio, donde las cuencas reciben las precipitaciones para acabar desembocando en el mar [26].

Además de lo anterior, existe una caracterización según los regímenes de los ríos para la zona norte:

- En la zona norte grande se destacan los regímenes pluvial y pluvionival, es decir, su aporte es principalmente en base a las lluvias.
- En el norte chico se presentan principalmente los regímenes pluviales y mixtos, es decir, su aporte se debe a lluvias y deshielos.

Por otro lado, según los patrones de escurrimiento y sus características, se puede dividir al territorio chileno en provincias y subprovincias hidrogeológicas, destacándose la altiplánica, andina vertiente Pacífico y cuencas costeras que pueden observarse en la Figura 3.1.

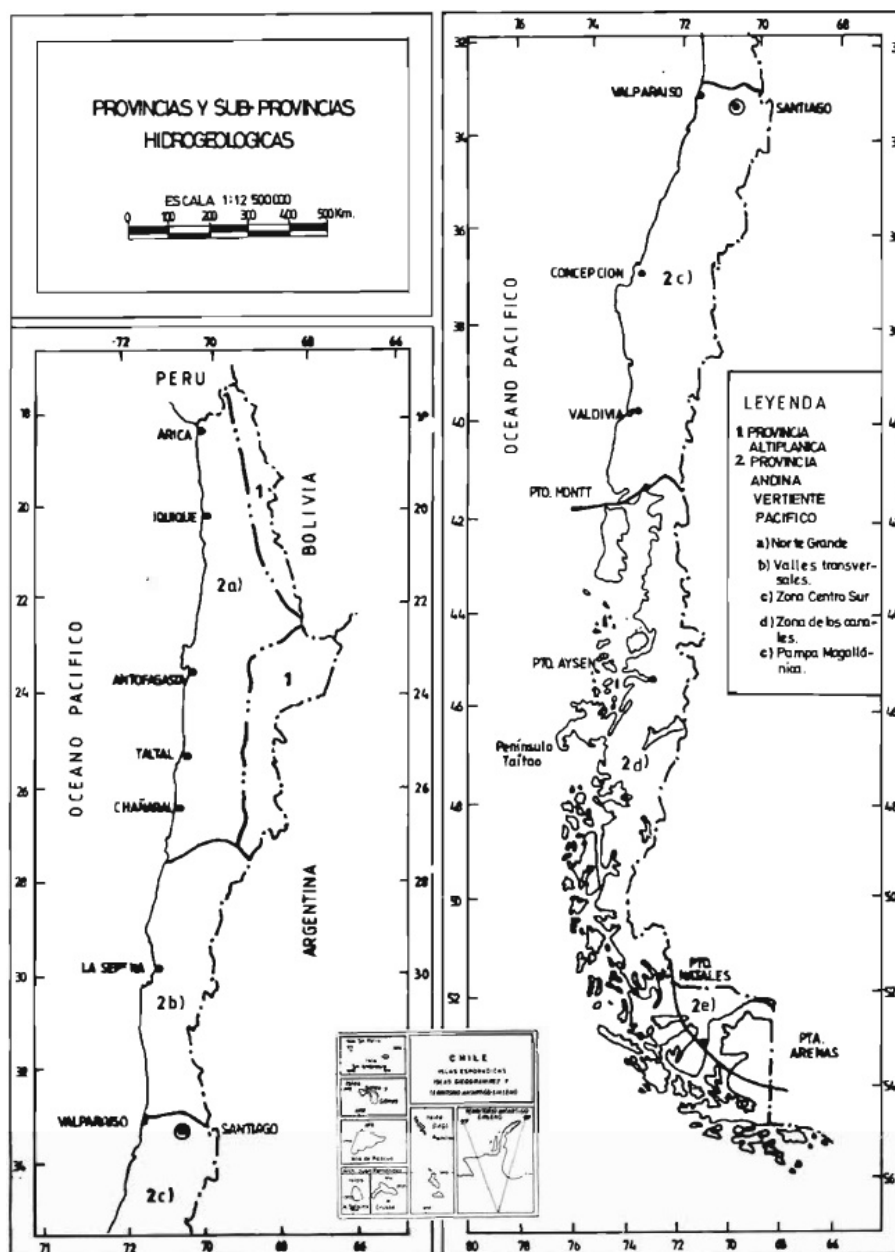


Figura 3.1: Provincias y subprovincias hidrogeológicas. Imagen modificada de [27].

3.3.1. Casos de estudio

Los casos de estudio seleccionados corresponden a las regiones de Antofagasta y Atacama que corresponden a las zonas con mayor estrés hídrico durante el año 2018 [8]. Se observa en la Figura 1.2 el déficit hídrico que tienen ambas regiones, comparado a otras zonas de Chile.

A continuación se presentan las regiones de Antofagasta y Atacama, junto con una pequeña descripción de ambos y el análisis de distintos aspectos hidrográficos que sirven para establecer algunos parámetros exclusivos de cada caso de estudio.

Antofagasta

La región de Antofagasta se ubica en el Norte Grande entre los 21° 28' hasta los 25° 55' de latitud sur [28]. Presenta un área de 126.000 km^2 aproximadamente, correspondiente a un 16,67 % del territorio nacional [28]. Se divide en 3 provincias: Antofagasta, El Loa y Tocopilla.

Predomina el clima desértico donde se presenta una marcada aridez y escasez de agua [29]. De acuerdo a la Figura 3.1, se tiene la presencia de las provincias hidrológicas de Andina Vertiente Pacífico del Norte grande y la provincia altiplática. Dependiendo de la zona de la región, se pueden encontrar varios microclimas que hacen que las temperaturas y precipitaciones varíen. En la Figura 3.2 se pueden observar los cambios en la temperatura y precipitación media anual en distintas zonas de la región.

La extrema aridez en la Depresión Intermedia y la escasa vegetación definen el Desierto de Atacama, donde los efectos marítimos pierden importancia debido a la existencia de la Cordillera de la Costa [30]. Entre los 2.000 y 3.500 m.s.n.m. se presencia el clima desértico normal, donde el mayor volumen de precipitaciones ocurre en los meses de verano [30]. Sobre los 3.500 m.s.n.m se ubica el clima Tundra por efecto de la Altura, correspondiente a la zona altiplánica. En esta zona se encuentra el mayor volumen de precipitaciones de la región [30].

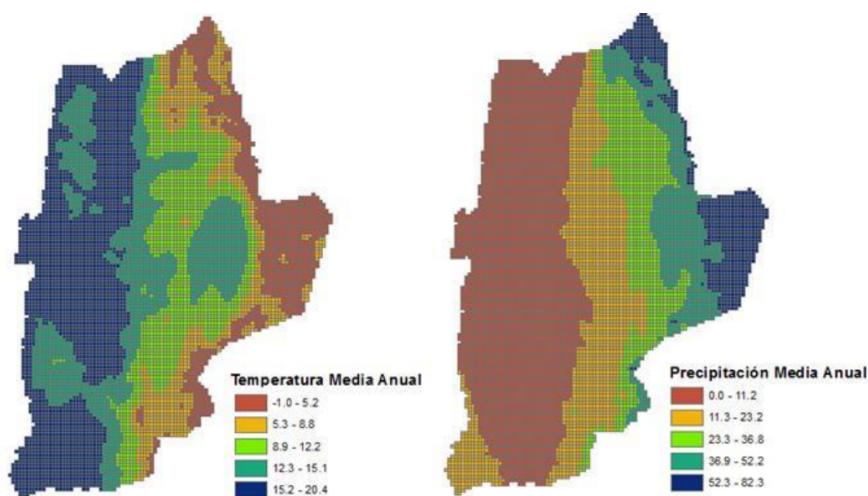


Figura 3.2: Variación temperatura media anual y precipitación media anual en Antofagasta [29].

Para obtener los datos de precipitación se accedió a la Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea de la Dirección General de Aguas [31]. Se analizaron los reportes meteorológicos de precipitaciones mensuales desde el año 2009 hasta el 2019, para conocer el promedio de cada estación. Luego se calculó el promedio por provincia. Estos valores se encuentran en la Tabla 3.1. Para más detalles, revisar el Anexo A.

Tabla 3.1: Datos de precipitaciones por provincia en Antofagasta. Elaboración propia en base a datos de DGA [32].

Provincia	Precipitación promedio provincia (mm/año)
Tocopilla	0,9
El Loa	59,27
Antofagasta	14,01

Estos datos sirven para establecer patrones de lluvias en distintos puntos de la región, sin embargo, existen estaciones de monitoreo que no presentan datos de manera constante en el tiempo. Para esto, se utilizaron sólo los años que presentan datos para el cálculo del promedio. Pese a esto, no existen más fuentes de extracción de este tipo de datos.

Con respecto a la hidrografía regional, se caracterizan las cuencas endorreicas, a excepción del río Loa, el más largo de Chile. En la Tabla A.1 del Anexo A se encuentra en detalle cada una de ellas. La hidrografía completa se muestra en la Figura 3.3. Los principales ríos a considerar en la presente memoria se muestran en la Figura 3.4 y se encuentran detallados en la Tabla 3.2.

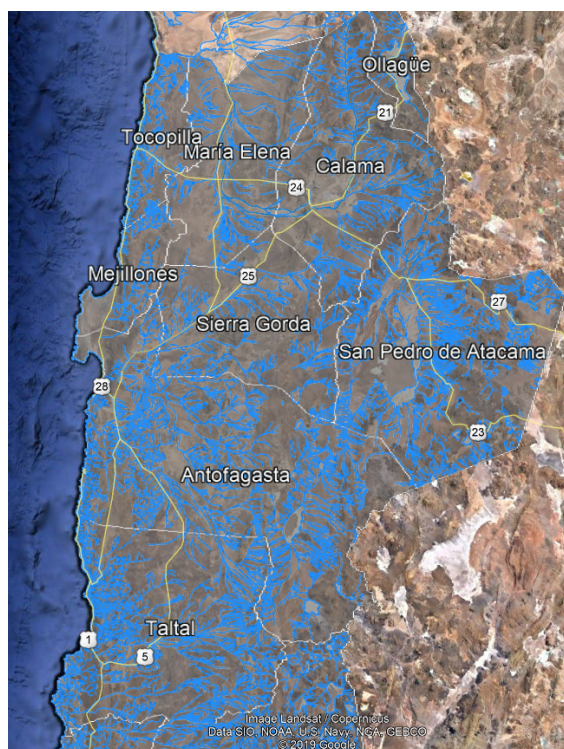


Figura 3.3: Hidrografía para la región de Antofagasta. Capa extraída de <http://datos.cedeus.cl/> e importada en Google Earth ®.



Figura 3.4: Principales ríos para la región de Antofagasta. Capa extraída de <http://datos.cedeus.cl/> e importada en Google Earth ®

Tabla 3.2: Principales ríos de Antofagasta

Río	Cuenca a la que pertenece	Régimen
Río Loa	021-Río Loa	Pluvionival [33]
Río Salado	031- Costeras Q. Pan de Azucar y R. Salado	Pluvionival [33]
Río San Pedro	025- Salar de Atacama	Pluvial [34]
Río Vilama	025- Salar de Atacama	Pluvial [35]

Con respecto al tratamiento de agua, es Aguas Antofagasta S.A. la empresa sanitaria encargada de proveer de agua potable y de tratar el agua servida en la región. Sin embargo, el territorio operacional de la empresa está acotada a un área reducida de la región, por lo que no están obligadas a abastecer al 100 % de la población. El territorio operacional se observa en la Figura 3.5, en donde las zonas en azul y delimitadas por un círculo rojo son las zonas en donde la empresa debe abastecer casi al 100 % de la población. Se puede observar, también, que el territorio operacional deja una gran porción de terreno sin abastecimiento.

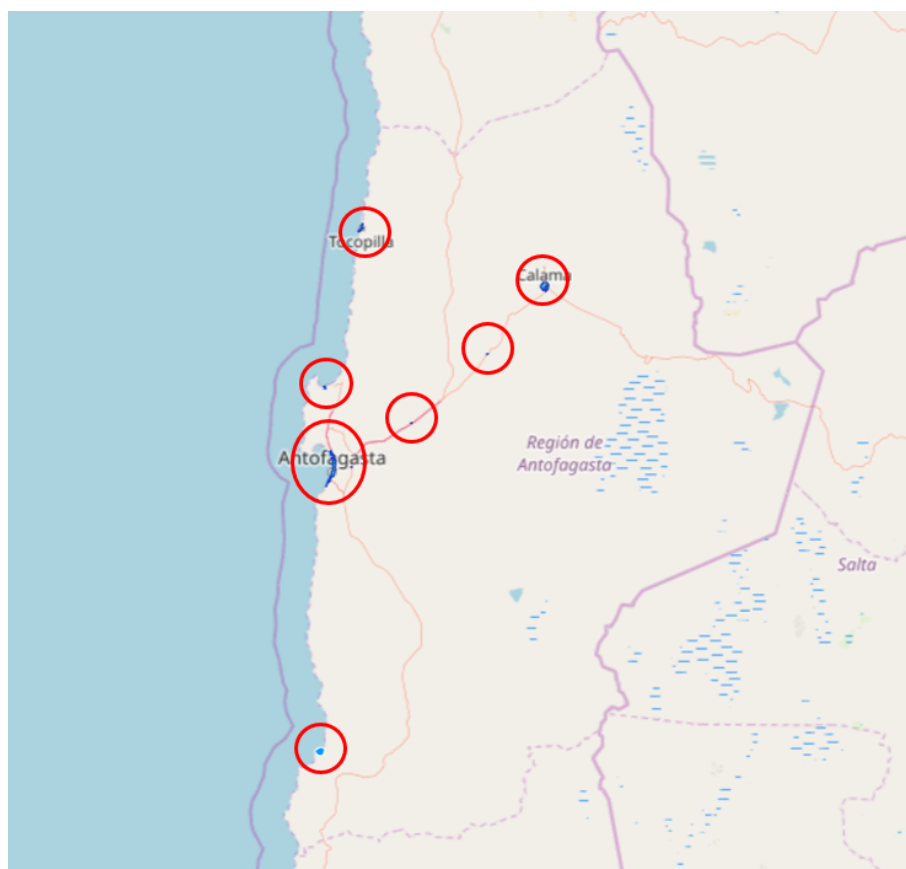


Figura 3.5: Territorio operacional empresa Aguas Antofagasta S.A. [36]. Se observa en azul los sectores en los que opera la empresa sanitaria. Se encierra en un círculo rojo para diferenciar los sectores de otras zonas.

Atacama

La región de Atacama se ubica en el norte chico entre los 26° y $29^{\circ}20'$ de latitud sur [37]. Posee un área de 75.000 km^2 aproximadamente, correspondientes al 9,94% del territorio nacional [37]. Se divide en 3 provincias mostradas en la Figura B.1 del Anexo B, donde Vallenar es la capital de la provincia de Huasco y las demás capitales tienen el mismo nombre que su provincia [37].

Las planicies litorales se encuentran caracterizadas por un desierto costero con nubosidad abundante, donde la humedad varía de 65% y 80% y las precipitaciones se encuentran entre 10 y 40 milímetros al año aproximadamente [38]. Al interior de la región, en los valles transversales, se presencia un clima desértico transicional, caracterizado por un decaimiento en las precipitaciones y humedad del aire, comparado con la zona costera [38]. En la precordillera y cordillera se encuentra el clima desierto frío de montaña, desde los 1.500 m.s.n.m. hasta los 4.000 m.s.n.m., que se caracteriza por la baja humedad relativa del aire y las bajas temperaturas de la zona [38]. Sobre los 4.000 m.s.n.m. se encuentra el clima de tundra de alta montaña, que presenta bajas temperaturas durante todo el año, combinándose rasgos desérticos con polares, intensificados por una fuerte insolación y radiación [38].

Para obtener los datos de precipitación se accedió a la Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea de la Dirección General de Aguas [31]. Se analizaron los reportes meteorológicos de precipitaciones mensuales desde el año 2009 hasta el 2019, para conocer el promedio de cada estación. Luego se calculó el promedio por provincia. Estos valores se encuentran en la Tabla 3.3. Para ver más detalles, revisar el Anexo B.

Tabla 3.3: Datos de precipitaciones por estación en Atacama. Elaboración propia en base a información de DGA [32].

Provincia	Precipitación promedio provincia (mm/año)
Chañaral	44,69
Copiapó	36,8
Huasco	57,75

Al igual que en Antofagasta, estos datos sirven para establecer patrones de lluvias en distintos puntos de la región, sin embargo, existen estaciones de monitoreo que no presentan datos de manera constante en el tiempo. Para esto, se utilizaron sólo los años que presentan datos para el cálculo del promedio. Pese a esto, no existen más fuentes de extracción de este tipo de datos.

Con respecto a la hidrografía regional, se caracterizan los ríos Copiapó, Huasco y Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacífico [39]. En la Tabla B.1 del Anexo B se encuentran en detalle cada una de ellas. La hidrografía completa se muestra en la Figura 3.4 y los principales ríos a considerar en la presente memoria se muestran en la Figura 3.7, en la Tabla 3.4 se encuentran detallados cada uno de ellos



Figura 3.6: Hidrografía para la región de Atacama. Capa extraída de <http://datos.cedeus.cl/> e importada en Google Earth ®.



Figura 3.7: Principales ríos para la región de Atacama. Capa extraída de <http://datos.cedeus.cl/> e importada en Google Earth ®.

Tabla 3.4: Principales ríos de Atacama

Río	Cuenca a la que pertenece	Régimen
Río Copiapó	034- Río Copiapó	Mixto [40]
Río Huasco	038- Río Huasco	Nival [40]

Al igual que en Aguas Antofagasta S.A. en Antofagasta, Aguas Chañar S.A. es la empresa sanitaria encargada de proveer de agua potable y de tratar el agua servida en la región. Sin embargo, el territorio operacional de la empresa está acotada a un área reducida de la región, por lo que no están obligadas a abastecer al 100 % de la población. El territorio operacional se observa en la Figura 3.8, en donde las zonas en azul y delimitadas por un círculo rojo son las zonas en donde la empresa debe abastecer casi al 100 % de la población. Se puede observar, también, que el territorio operacional deja una gran porción de terreno sin abastecimiento.

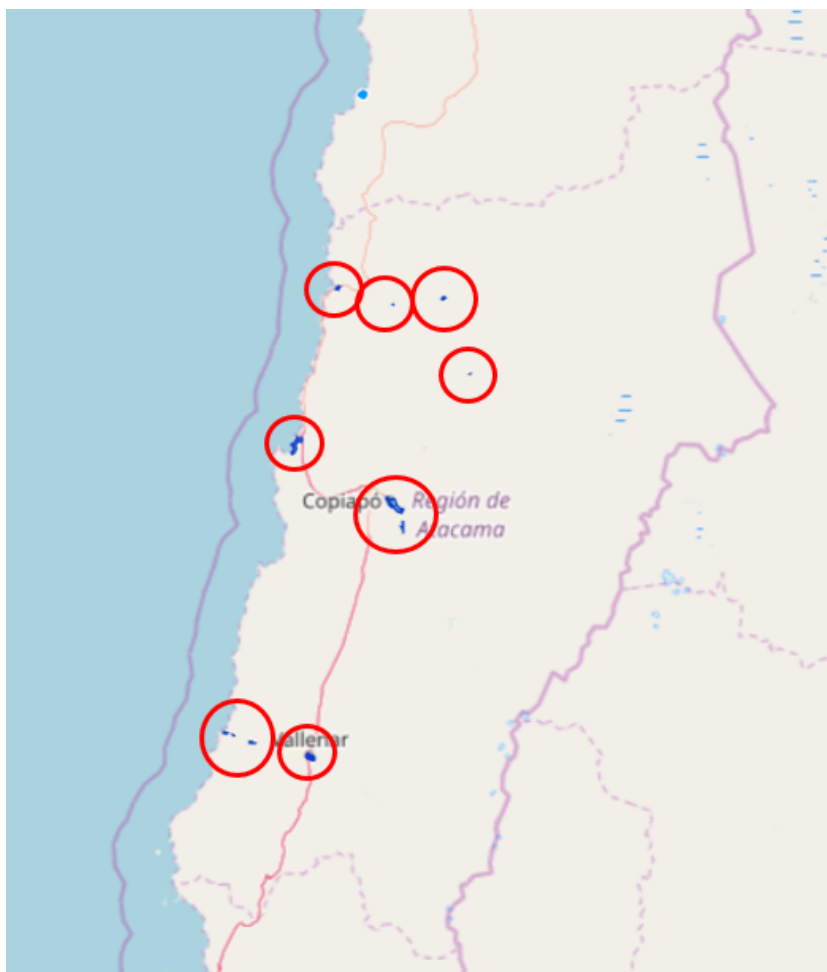


Figura 3.8: Territorio operacional empresa Aguas Chañar S.A. [36]. Se observa en azul los sectores en los que opera la empresa sanitaria. Se encierra en un círculo rojo para diferenciar los sectores de otras zonas.

3.3.2. Consumos hídricos

Además de lo anterior, las cuencas tienen distintos tipos de consumo, donde los principales se pueden clasificar en consumo industrial, agrícola y domiciliario. Una de las causas de la escasez hídrica es el aumento constante de estos tipos de consumo y, además, que se tienen derechos de agua sobre otorgados en las cuencas [41]. En esta memoria se utilizarán consumos actuales, los cuales pueden variar con el tiempo dependiendo del escenario futuro en que se encuentre el país.

Para definir los consumos se siguieron distintas metodologías:

- **Consumo domiciliario:** Para establecer el consumo domiciliario, se buscó la información dada por el CENSO 2017 y se establecieron distintos puntos geográficos dados por una comuna o una población en particular, dentro de las distintas provincias. Luego, los habitantes de cada punto seleccionado se multiplicó por un consumo promedio de 170 L/día-hab [42]. Lo anterior se ve reflejado en la ecuación general 3.1, donde CD corresponde a consumo domiciliario y Pob a los habitantes de cada comuna o pueblo.

$$CD_i \left(\frac{m^3}{s} \right) = Pob_i(hab) \cdot 170 \left(\frac{L}{día \cdot hab} \right) \cdot \frac{1}{3600 \cdot 24 \cdot 1000} \left(\frac{m^3 \cdot día \cdot h}{L \cdot h \cdot s} \right), \forall i \in Comuna \quad (3.1)$$

- **Consumo industrial:** Para definir el consumo industrial se pidieron datos de la emisión de RILes a cuerpos de agua dados por el Decreto Supremo 90, mediante el Portal de Transparencia del Gobierno de Chile. Como son muchos datos, la caracterización de cada industria como un punto fijo en el mapa resulta una tarea compleja debido al alto número de empresas que pueden existir en una región. Para simplificar esto, se seleccionó la industria que más RILes descarga, por provincia, y se localizó como un punto en el mapa. Las demás empresas que no se tomaron en consideración, se asumieron como un conglomerado de empresas en un punto fijo del mapa. Este punto se estableció en la zona con mayor población por cada provincia. La descarga de RILes de este conjunto de industrias por provincia, se asumió como la suma de descarga de cada empresa incluida en el conglomerado. Si bien esto conlleva a un error, el simplificar los puntos como un conglomerado implica una disminución en los tiempos de cómputo, en los tiempos de implementación del problema y en el cálculo de distancias y diferencias de alturas entre distintos puntos.

Por otro lado, los datos pedidos por Transparencia no incluyen a las industrias mineras. Para establecer los puntos de este tipo de empresas, se buscó en el Mapa Minero las empresas que estaban geográficamente cerca, para conformar un núcleo minero en un punto geográfico dado. Así, se tienen varios puntos de conjuntos de empresas mineras. Para encontrar el consumo de agua de estas empresas, se buscó en bibliografía el consumo minero por región, el cual se dividió por el número de industrias totales mineras que se encontraban en cada región. Se asumió que cada empresa minera consume un volumen similar de agua. El consumo total de cada conglomerado de empresas (que se representa como un único punto en el mapa) se encuentra sumando el consumo individual de cada empresa. Esto último puede disminuir el error de asumir un consumo

igual para cada empresa, puesto que se unen mineras variadas en un mismo punto. Esta metodología también tiene errores asociados, pero para encontrar el consumo exacto de cada empresa minera es necesario un estudio más completo y se escapa al tiempo de la presente memoria.

- **Consumo agrícola:** Para definir el consumo agrícola se buscó en el CENSO Agropecuario las principales plantaciones de cada sección y se calculó su demanda hídrica mediante el siguiente set de ecuaciones [43]:

$$Db(mm/año) = \frac{Dn(mm/año)}{Ef_r} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

$$Dn(mm/año) = ETc(mm/año) - PE(mm/año) \quad (3.3)$$

$$ETc(mm/año) = Kc \cdot ET_0(mm/año) \quad (3.4)$$

En las tres ecuaciones anteriores, Kc corresponde al coeficiente de cultivo, que depende de cada tipo de plantación, ET_0 corresponde a la evapotranspiración de referencia, que depende de la ubicación geográfica de la plantación, ETc corresponde a la evapotranspiración del cultivo, PE a la precipitación efectiva sobre el cultivo, en este caso se asume 0, Db corresponde a la demanda hídrica bruta final, Dn la demanda hídrica neta, A corresponde al área de cultivo y Ef_r a la eficiencia de riego, asumida en un 60% en el peor de los casos [43].

Finalmente para establecer un consumo se tiene la siguiente relación de unidades:

$$Dn(m^3/s) = Dn\left(\frac{mm}{año}\right) \cdot 10 \left(\frac{m^3}{ha \cdot mm}\right) \cdot A(ha) \cdot \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \left(\frac{año \cdot día \cdot h}{día \cdot h \cdot s}\right) \quad (3.5)$$

Una vez identificado las comunas donde hay mayor producción agrícola, se utilizan imágenes satélites para identificar los lugares geográficos en los que sea más probable encontrar una plantación agrícola dentro de cada provincia.

El detalle de los cálculos anteriores se encuentran en el Anexo C para ambas regiones. Un resumen de los resultados de los consumos se muestra en la Tabla 3.5

Tabla 3.5: Resumen de consumos para cada caso de estudio

Región	Provincia	Consumo domiciliario (m^3/s)	Consumo industrial (m^3/s)	Consumo agrícola (m^3/s)
Antofagasta	Antofagasta	0,78	2,38	$6,07 \cdot 10^{-4}$
	El Loa	0,35	2,69	1,03
	Tocopilla	0,06	1,52	$7,2 \cdot 10^{-3}$
Atacama	Copiapo	0,37	0,88	8,02
	Chañaral	0,05	0,40	$8,5 \cdot 10^{-4}$
	Huasco	0,15	0,38	3,18

3.4. Discusiones

De lo estudiado anteriormente se destaca el tipo de área de escurrimiento endorreica y arreica para la zona norte de Chile. Además se establecieron parámetros importantes como consumos hídricos, caudales y precipitaciones, los cuales se utilizarán en la sección de formulación del problema. Con respecto a las plantas de tratamiento actuales, es interesante notar que existe una gran porción del terreno sin abastecimiento, tanto para Antofagasta como para Atacama, por lo que no es de extrañarse que exista un alto porcentaje de población sin acceso a agua potable, los cuales sólo tienen acceso a agua de pozo o, en el peor de los casos, no tienen acceso alguno a agua.

Considerar sólo los principales ríos es un supuesto fuerte, ya que le quita flexibilidad al problema, pero se observa de las hidrografías que son sistemas muy complejos con muchas conexiones entre sí. Además, no existen estaciones de medición en cada una de las 'ramas' de los ríos, por lo que no se sabría si el flujo que se está considerando es el real o tiene un error importante asociado a la falta de datos. Así, tomar sólo los ríos principales hace que el problema sea abordable, pero con impactos en los resultados posteriores.

Con respecto a la determinación de los consumos, existen juicios éticos al imponer algunos supuestos, donde el principal se da al momento de asumir un consumo promedio de 170 L/día-hab, ya que se impone que todos tendrán derecho a un flujo constante de agua. Muchas familias en zonas de escasez hídrica se ven forzados a usar menos agua, debido a la falta de ella. Por ejemplo, toman duchas más cortas, lavan la ropa con menos agua, aprovechan el agua de algunas tareas para asignarla a otras, etc. El asignarle un consumo mayor, significa que la calidad de vida de estas personas pudiese aumentar, teniendo un acceso al agua promedio que se tiene en Chile. Esta decisión se toma de una manera que asegure agua potable a toda la gente de forma igual para todo el país, y que la falta de este recurso natural no siga siendo una razón que aumente la inequidad y brechas sociales.

Por otro lado, para el consumo industrial, el mayor error que se puede presentar es el asociado a la ubicación de los nodos, por sobre el error generado en el consumo de los mismos, ya que éste último es calculado mediante datos encontrados en referencia y por el Portal de Transparencia del gobierno. Sin embargo, como las industrias son tan variadas y se encuentran en muchos puntos geográficos distintos, se hace imposible una caracterización completa de este consumo. Esto puede tener impacto en los resultados posteriores, al momento de decidir instalar una planta de tratamiento, debido al bajo costo de transporte de agua cuando se tiene una cercanía con los consumos.

Con respecto al consumo agrícola, el análisis es similar al de consumo industrial, pero el error asociado es menor, ya que existen zonas donde es más probable una mayor concentración de este tipo de consumos: espacios verdes cercanos a ríos.

Pese a lo anterior, es difícil cuantificar el impacto de los supuestos tomados y de cómo pueden mejorar, donde existe un trade-off entre el tiempo en realizar el estudio y la exactitud de los datos a utilizar.

Finalmente, se puede desprender que el entender el comportamiento hídrico general de una

región sirve para poder tomar decisiones más cercanas a la realidad, sin embargo, los cálculos hechos en esta sección anterior contienen algunos supuestos para simplificar el modelamiento del problema, por lo que pueden existir diferencias entre los parámetros encontrados y los parámetros reales.

Capítulo 4

Sistemas de tratamiento y redes de aguas

El objetivo de las plantas de tratamiento de aguas es, mediante una serie de procesos, cambiar las concentraciones de contaminantes que ésta posea para dejarla apta, ya sea para su consumo (Planta de Tratamiento de Agua Potable) o para descarga en cauces naturales (Planta de Tratamiento de Aguas Servidas).

En esta sección de la presente memoria, se estudian las plantas existentes en el mundo y sus tecnologías, las plantas presentes en los casos de estudio y, en base a ciertos parámetros, las nuevas plantas de tratamiento que podrían implementarse.

En cuanto a normativa, el tratamiento de agua potable está regido por la Norma Chilena 409 y se separa en dos partes: la primera regula los requerimientos de calidad y la segunda, el muestreo e inspección y análisis de las muestras. Con respecto a la primera parte, se consideran 5 parámetros [44]:

- Tipo 1: Parámetros microbiológicos.
- Tipo 2: Sustancias químicas de impacto a la salud.
- Tipo 3: Elementos radioactivos.
- Tipo 4: Parámetros relativos a las características organolépticas.
- Tipo 5: Parámetros de desinfección.

El Decreto 90 establece la norma de emisiones de residuos líquidos hacia aguas marinas y continentales superficiales [45] y la ley 21.075 regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises [46]. Ambas normativas regulan las emisiones de plantas de tratamiento de aguas servidas y, la segunda, normaliza las emisiones de las plantas de tratamiento de residuos líquidos industriales.

A continuación se presenta la metodología específica para abarcar la sección.

4.1. Metodología específica

Como se mencionó anteriormente las fuentes tradicionales de agua corresponden a fuentes subterráneas o cauces superficiales. Sin embargo, en Chile también han ido en aumento las plantas desalinizadoras que utilizan el agua de mar como fuente alternativa de tratamiento. Por otro lado, existe la potabilización de agua lluvia y potabilización de aguas servidas. El primero de ellos se aplica, principalmente, en localidades rurales, mientras que el segundo, se aplica en localidades donde las precipitaciones y deshielos son escasos. Para tratar estos tipos de agua existen distintos tratamientos, que se pueden dividir en dos grandes grupos: tratamiento convencionales, para el agua subterránea y superficial, y tratamientos de nuevas fuentes, para el agua de mar, agua de lluvia y potabilización de aguas servidas.

A continuación se presentan los pasos que se siguieron para seleccionar los tratamientos de agua convencionales y no convencionales que se podrían encontrar en una región:

- Investigación bibliográfica inicial de los distintos tratamientos de agua que pueden existir.
- Investigación sobre las plantas de tratamiento actuales que existen en los casos de estudio.
- Selección de las tecnologías para las plantas de tratamiento nuevas que se podrían instalar.
- Investigación en profundidad las tecnologías de las plantas de tratamiento que se podrían implementar, señalando ciertas características como restricciones de uso o capacidad, costos de instalación, etc.
- Estimación del costo de operación y costo de capital, cada uno aplicado para plantas de tratamiento y para la red completa. La metodología individual será explicada en la sección correspondiente.

4.2. Plantas convencionales de agua

4.2.1. Plantas de potabilización (PTAP)

El propósito de tratar el agua es acondicionar y modificar para eliminar características indeseables, impurezas y agentes patógenos con el fin de proporcionar agua segura, agradable y aceptable a los consumidores [47].

El proceso de potabilización de agua consta de varias etapas [47]:

1. **Pretratamiento:** En el caso de que la fuente sea subterránea, el mismo suelo actúa como filtro natural y remueve un gran porcentaje de sedimentos suspendidos. Sin embargo, si la fuente es superficial, es necesario un sistema de filtración artificial como el paso a través de finos o gruesos, tamices, desarenadores o rejillas de desbaste. En esta etapa se eliminan hojas, ramas, peces, sólidos grandes u otros sedimentos suspendidos [47].
2. **Coagulación-Floculación:** Proceso fisicoquímico que aumenta el tamaño de los contaminantes. El agua que entra a la etapa posee coloides que, en su superficie, poseen

cargas que repelen a las cargas de los otros coloides, lo que evita una aglomeración y posterior decantación por gravedad. En el proceso tradicional, se le añade coagulante al agua para desestabilizar el coloide eliminando las capas eléctricas que rodean a la partícula [48]. Una vez ocurrido esto, se le añade un floculante que permite crear puentes de una superficie a otra y aglomerar las partículas anteriormente desestabilizadas formando flóculos de mayor tamaño [48]. Este proceso se puede observar en la Figura 4.1 [49].

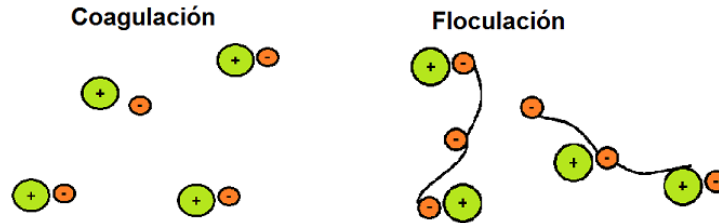


Figura 4.1: Formación de coágulos y flóculos mediante adición de químicos [49].

3. **Sedimentación:** Luego del proceso de floculación, se envía el efluente a tanques de sedimentación cuyo objetivo es que los flóculos decanten por gravedad. Para esto, el agua debe permanecer durante largos períodos de tiempo en un tanque decantador para lograr que los coloides lleguen al fondo. Finalmente, las impurezas son extraídas accionando válvulas que las extraen por ductos de limpieza [50]. Sin embargo, este no es el único mecanismo de clarificación del agua en esta etapa: existen celdas de flotación por aire disuelto (DAF), que consisten en tanques cuya zona inferior tiene un ingreso constante de aire a alta presión que ayuda a elevar los coloides para que en la superficie del tanque se forme una capa de flóculos y, en el fondo, se encuentre el agua clarificada. Finalmente, las impurezas son removidas desde la superficie con paletas especializadas para esta función [51].
4. **Filtración:** En esta etapa, el agua clarificada de la etapa anterior pasa a través de un medio filtrante como arena, gránulos, entre otros, con el objetivo de remover impurezas en partículas y flóculos restantes [47].
5. **Desinfección:** En el tratamiento convencional, se emplea cloro como agente desinfectante y permite eliminar los microorganismos presentes. Con este proceso se evita la proliferación de contaminantes en la red de agua y sirve como indicador de calidad permitiendo cumplir con la norma sanitaria [50].

4.2.2. Plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS)

El tratamiento de aguas servidas busca eliminar agentes nocivos para la salud que se generan luego del consumo humano, produciendo un efluente apto para su disposición en el medioambiente. El proceso consta de varias etapas [52]:

1. **Tratamiento previo y primario:** Tiene como finalidad eliminar por medios físicos, elementos que podrían dañar a los equipos siguientes en la planta, además de estabilizar el caudal o ajustar el pH. Entre estos equipos se incluyen sedimentadores, tamices,

tanques de estabilización y decantadores, que eliminan gran parte de la materia orgánica presente [52]. También se pueden incluir procesos fisicoquímicos como la coagulación y floculación.

2. **Tratamiento secundario:** Incluyen procesos biológicos y químicos, y buscan eliminar la materia orgánica disuelta presente, realizando transformaciones para poder eliminarlas de manera más fácil. Los procesos biológicos incluyen sistemas de lecho fluidizado, lodos activos, lagunas aireadas, tratamientos anaerobios, filtros biológicos, entre otros. Los sistemas más utilizados actualmente son lodos activos y filtros de lecho fluidizado [52].
3. **Desinfección:** Para cumplir con la normativa, se requiere una etapa de desinfección al proceso cuyo objetivo es evitar la proliferación de microorganismos en el agua [47].
4. **Tratamiento terciario:** En general, no es aplicado puesto que con los tratamientos previos ya puede ser considerado un efluente limpio para descarga en cauces naturales según la ley [46]. Sin embargo, para obtener una mejor calidad del agua, se puede aplicar este tratamiento utilizando procesos como coagulación-floculación, microfiltración (MF), nanofiltración (NF), osmosis inversa (RO), entre otros [53].

Los residuos tienen un tratamiento independiente de esta línea de tratamiento de agua, en la presente memoria no se ahondará en estos residuos.

El ciclo del agua desde su captación hasta su disposición se puede observar en la Figura 4.2 [54]. Cabe destacar que la imagen considera captación y disposición desde y hacia cauces superficiales, pero también se tienen las fuentes subterráneas.



Figura 4.2: Ciclo del agua en hogares, desde su extracción hasta su disposición en un caudal natural [54].

4.3. Nuevas fuentes de agua y su potabilización

Aunque los cauces superficiales y acuíferos son las principales fuentes de agua para la potabilización de agua actualmente, existen otras fuentes que pueden utilizarse tales como

agua de mar, agua de lluvia o agua servida. La potabilización de esta última puede tomar el nombre de *reciclaje de agua*.

4.3.1. Desalinización

Desde hace varios años, el agua de mar es considerada como una opción para ciudades con escasez hídrica y Chile no es una excepción. Actualmente, Chile provee un 1% de agua potable a partir del mar. Antofagasta cuenta con la planta desalinizadora más grande en Latinoamérica, y se planea la instalación de otra mega planta desalinizadora en la misma región [55]. Además, el sector minero del norte utiliza estos sistemas para purificar el agua y utilizarla en su producción, y se espera que el consumo desde esta fuente sea cada vez mayor [56].

En general, se argumenta que tratar agua de mar puede no ser sustentable debido a los altos costos y altos consumos energéticos, en comparación con otros tipos de tratamiento, sin embargo, es una de las opciones de fuente alternativa más utilizadas en Chile y el mundo. Para producir agua desalinizada, es importante analizar la calidad del agua de mar y los contaminantes que pueden estar presentes. Asegurar una calidad promedio requiere la elección de un emplazamiento para la captación de agua de mar apta [57]. El proceso de potabilización de agua de mar consta de varias etapas, donde se destacan dos grandes tipos de tratamiento:

- **Desalinización mediante membranas:**

1. **Pretratamiento:** El objeto del pretratamiento es ajustar las características físico-químicas y biológicas del agua captada a las necesidades del proceso posterior, para evitar problemas como la corrosión y formación de incrustaciones en los equipos. Los objetivos específicos de esta etapa en este tipo de destilación son [57]:
 - Eliminar sólidos en suspensión.
 - Evitar la precipitación de óxidos metálicos y sales.
 - Reducir el contenido de materia orgánica y la actividad biológica del agua.

Existen pretratamientos físico-químicos, tales como acidificación, dosificación de inhibidores de la incrustación, coagulación-floculación, flotación, filtración por lecho filtrante, entre otros [57]. También existen pretratamientos mediante membranas cuando se utiliza osmosis inversa en el tratamiento siguiente, estas tecnologías pueden ser microfiltración, nanofiltración o ultrafiltración [57].

2. **Tratamiento:** Para los procesos mediante membranas se suelen usar métodos como osmosis inversa, nanofiltración y electrodiálisis, donde el primero es el más utilizado [57].

- **Desalinización por destilación o evaporación:**

1. **Pretratamiento:** El objetivo de esta etapa en la desalinización por evaporación o destilación es reducir el riesgo de precipitación de sales insolubles en los intercambiadores de calor, y eliminar gases no condensables que pueden reducir el coeficiente de transferencia de calor, provocando corrosión en evaporadores y equipos de la planta [57]. Las tecnologías comúnmente usadas corresponden a tratamientos químicos que ayudan a la eliminación de incrustaciones y espumas, además de tecnologías para la desgasificación y descarbonatación [57].

2. **Tratamiento:** Los procesos de desalinización de este tipo han decaído considerablemente debido a los altos costos energéticos que conllevan, sin embargo, aún se utilizan en algunas partes del mundo. Los tratamientos pueden incluir varios tipos de técnicas, entre las que se incluyen la evaporación instantánea multietapa, la evaporación multiefecto en tubos horizontales, entre otros [57].
- **Post tratamiento:** Para ambas técnicas, muchas veces es necesaria la incorporación de otras tecnologías para potabilizar el agua tales como descarbonatación (secundaria, en el caso de la destilación), intercambio iónico y acondicionamiento químico (remineralización, fluoración y/o adición de cloro) [57].

4.3.2. Potabilización de agua lluvia

El tratamiento de agua lluvia es más simple que el mencionado anteriormente. Actualmente, en Chile, la captación de agua lluvias es utilizada principalmente para consumo agrícola y riego de áreas verdes, sin necesidad de un tratamiento [58]. Sin embargo, también puede ser potabilizada, dependiendo del sistema de captación. Si la captación se hace mediante tuberías instaladas bajo la ciudad, donde las zonas de acumulación sean puestas en la berma tal como sucede en algunas localidades de Estados Unidos, entonces es necesario un sistema de potabilización similar al convencional para fuentes superficiales [59]. Sin embargo, si la captación se realiza en una piscina dispuesta en un área determinada sobre la superficie, entonces la potabilización es similar al tratamiento convencional para aguas subterráneas [59]. Además, cabe destacar que actualmente existen tecnologías compactas para la potabilización de agua lluvia, cuyas capacidades son considerablemente más pequeñas que las de una planta convencional [59].

4.3.3. Reciclaje de agua

El reuso de agua está implementado en algunas partes del mundo con escasez hídrica y es una opción para muchos países en esta situación. Singapur lidera el consumo de agua reciclada debido a la falta de recursos naturales, donde en un inicio importaban agua, pero los altos costos los obligaron a buscar otras fuentes alternativas. Así, crearon sistemas de desalinización y reuso, donde a este último se le denominó '*NEWater*' y se prevé que aumente su uso hasta satisfacer un 50% de la demanda del país, tal como se muestra en la Figura 4.3 [60].

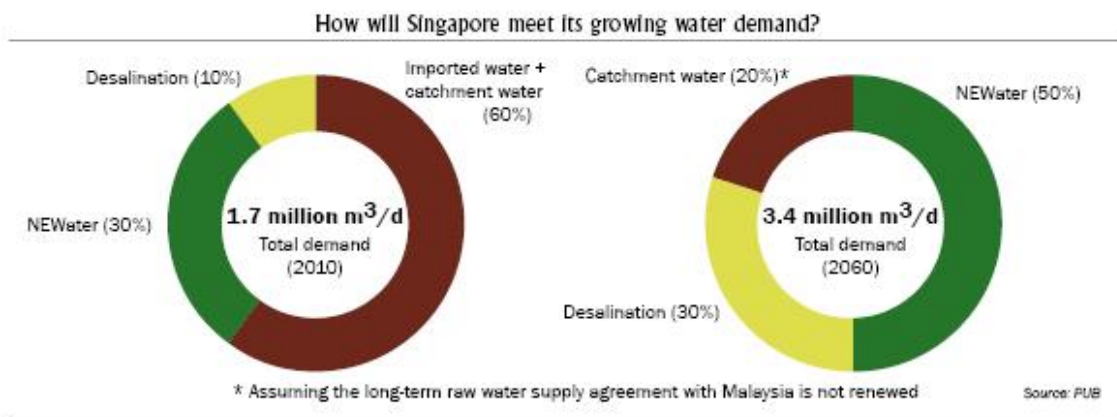


Figura 4.3: Mercado de agua en Singapur [60].

Actualmente se tienen tres tipos de reuso [61]:

- **Reuso indirecto no planeado:** Recuperación de un efluente que es re-introducido en un cuerpo de agua para ser potabilizado nuevamente en otro punto del mismo cauce.
- **Reuso indirecto planeado:** Recuperación intencional de un efluente que, mediante una serie de tratamientos, se utiliza para otros fines, como por ejemplo, para riego o como inyección en napas subterráneas para aumentar su caudal [61].
- **Reuso directo planeado:** Recuperación intencional de un efluente que, mediante una serie de tratamientos, es potabilizado y enviado para su consumo de manera directa [61].

El último reuso es teóricamente factible y se ha implementado parcialmente en algunos lugares, pero aún genera rechazo en gran parte de la población; de hecho, expertos aseguran que el mayor problema de la implementación de este tipo de tecnologías es el ámbito psicológico de las personas y el recelo que tiene la población a consumir esta agua [23].

Para el reuso planeado, la Asociación de Protección Ambiental norteamericana (*EPA*), posee una guía que explica la necesidad de implementación de estos tratamientos, cómo se debe manejar y planificar, cómo se puede reutilizar o qué problemas existen en otras partes del mundo [62]. En particular, incluye un capítulo de tratamientos y tecnologías a utilizar, que se basan en los modelos implementados actualmente mostrados en la Figura 4.4 [62]:

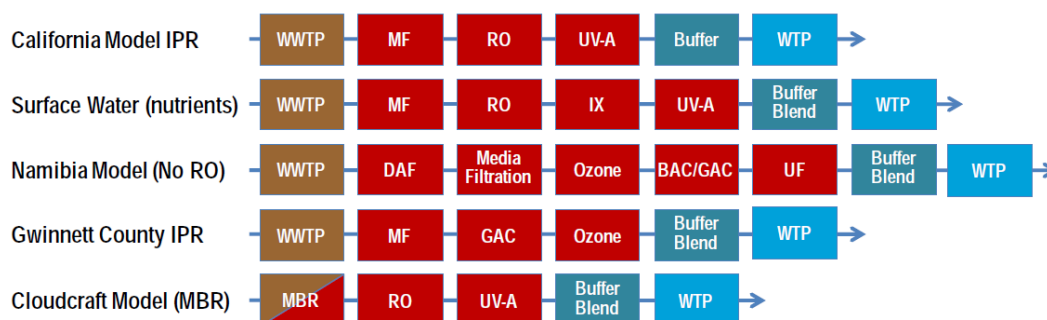


Figura 4.4: Escenarios de tratamiento de reuso para agua potable [62].

Las tecnologías mostradas son las siguientes:

- **WWTP:** Planta de tratamiento de aguas residuales convencional.
- **MF:** Microfiltración, tecnología en base a separación por membranas.
- **DAF:** Celdas de flotación por aire disuelto.
- **RO:** Ósmosis inversa, tecnología que se basa en las diferencias de presiones en dos secciones separadas por una membrana semi permeable [63].
- **Media Filtration:** Filtro de medios, es una tecnología que utiliza un medio filtrante poroso como arena, gránulos, espuma, entre otros [64].
- **MBR:** Bioreactor de membranas, es la combinación de tecnologías biológicas con sistemas de membranas para tratar el agua residual [65].
- **GAC:** Filtro de carbón activado, es una tecnología que utiliza carbón activado como medio poroso y elimina ciertas sustancias químicas y organolépticas [66].

- **UV-A:** Tratamiento con luz ultravioleta, elimina material orgánico al provocar alteración en el ADN, lo que genera la destrucción de la célula y evita su proliferación [67].
- **IX:** Intercambio iónico, es un proceso en el cual las partículas iónicas contaminantes son reemplazadas con otras inertes de similar carga mediante la utilización de resinas [68].
- **Ozone:** Tratamiento con ozono, actúa como desinfectante y se considera uno de los desinfectantes de acción más rápida que existen actualmente [69].
- **UF:** Ultrafiltración, tecnología basada en separación por membranas.
- **Buffer/Buffer Blend:** Amortiguadores naturales o artificiales, se basan en mezclar el agua tratada con otras corrientes para diluirla. En general, se realiza como un proceso para disminuir el impacto psicológico que tienen estos sistemas [62].
- **WTP:** Tratamiento de potabilización de agua convencional.

Para más detalle de las tecnologías, ver el Anexo D.

4.4. Plantas actuales

A continuación se presentan las plantas actuales que existen en Antofagasta y Atacama, representando los nodos existentes para plantas de tratamiento.

4.4.1. Antofagasta

Aguas de Antofagasta S.A. comenzó a desarrollar sus actividades el año 2003 [70]. Tiene sus principales captaciones en Lequena, Quinchamale y Toconce [71]. En el caso de Taltal, se extrae agua subterránea en el sector de Agua Verde [71]. El agua, luego de ser recolectada mediante tuberías, llega a la planta potabilizadora donde se añade coagulante (cloruro férrico) y gas cloro para atrapar impurezas [71]. Los coágulos decantan al fondo del tanque para, luego, ser filtrados. Finalmente se añade cloro y flúor para desinfectar según la normativa vigente [71]. Así, según la empresa, posee un tratamiento clásico de potabilización, en donde no tendrían pretratamiento, pero sí coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

Además de esta planta, también posee dos plantas desalinizadoras: 'La Chimba' y 'Taltal'. El proceso se muestra en la Figura 4.5 [71]:

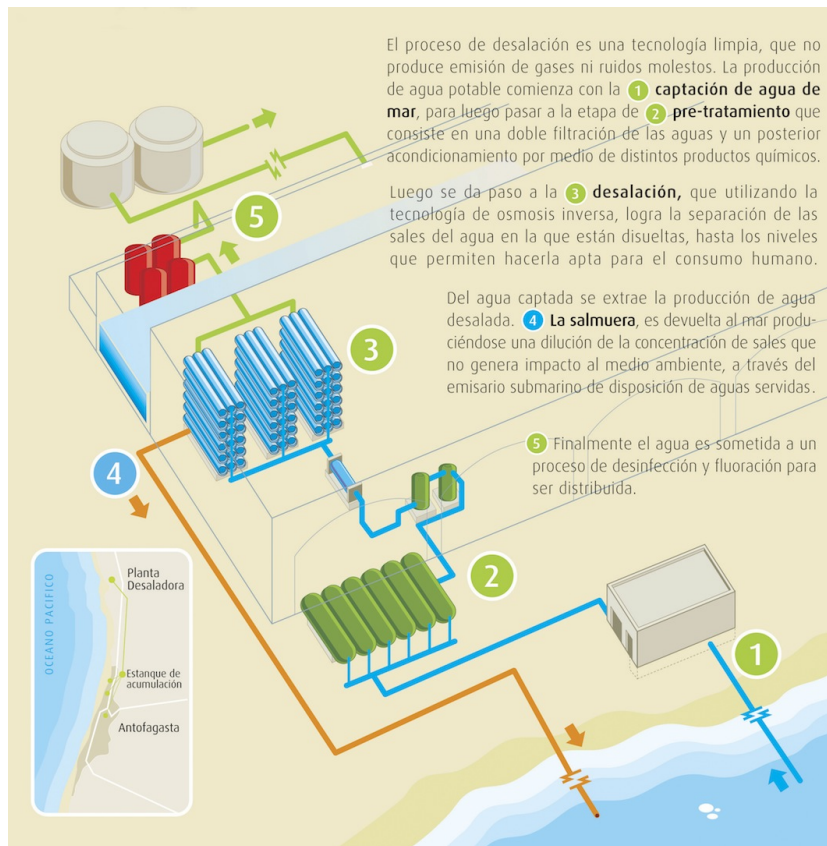


Figura 4.5: Proceso de desalación de La Chimba y Taltal [71].

4.4.2. Atacama

Al igual que Aguas Antofagasta, Aguas Chañaral cuenta con plantas de potabilización de agua con captaciones desde cauces naturales y de agua de mar [72]. Desde ahora en adelante, se entiende a fuente natural como los cauces superficiales o las aguas subterráneas, excluyendo al agua de mar.

En el caso de la desalinización, el proceso comienza con una filtración mediante filtros de arena. Luego pasa a un sistema de microfiltración con un límite de retención de 5 micras [73]. Este efluente pasa una mezcla con antiescalante para evitar la precipitación de sales, para luego pasar a la etapa de Osmosis Inversa, para luego mezclar el agua con agua desmineralizada de pozo [73]. Finalmente viene un post tratamiento con NaOH para ajustar el pH. El diagrama de flujos se muestra en la Figura 4.6 [73].

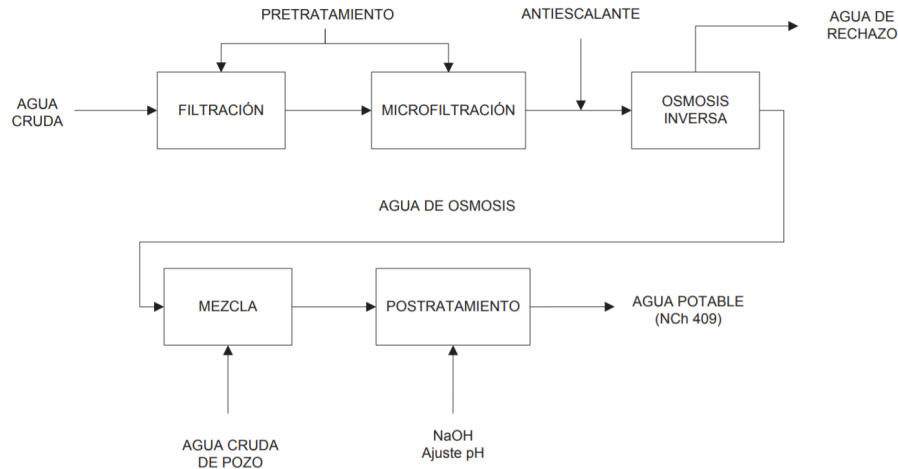


Figura 4.6: Proceso de potabilización en Aguas Chañar S.A. [73].

Con respecto a las plantas de potabilización de agua desde pozos, el proceso es similar, debido a que todas las plantas que posee Aguas Chañar en Atacama son de Osmosis Inversa, debido a la alta salinidad y concentración de metales que se encuentran en las aguas de la región [74]. Así, el proceso es igual al del mostrado en la Figura 4.6 [74].

4.5. Tecnologías para plantas nuevas

A continuación se presentan las tecnologías seleccionadas para las nuevas plantas de tratamiento que pueden instalarse, representando los nodos nuevos de la red.

4.5.1. Desalinización

En el mundo, la Osmosis Inversa lidera el tipo de tecnología ocupada para este tipo de tratamientos, con un 59 %, seguida por la evaporación en un 27 % y, finalmente, la destilación en un 14 % [75]. En el caso de Chile, esta situación no es diferente debido a que la evaporación y destilación no son utilizadas de forma general por su alto costo operacional [75].

Así, en el caso de la desalinización, se asumirá una planta estándar de osmosis inversa, con un post tratamiento químico sin incluir la mezcla de agua. Este proceso se puede observar en la Figura 4.7 [76].

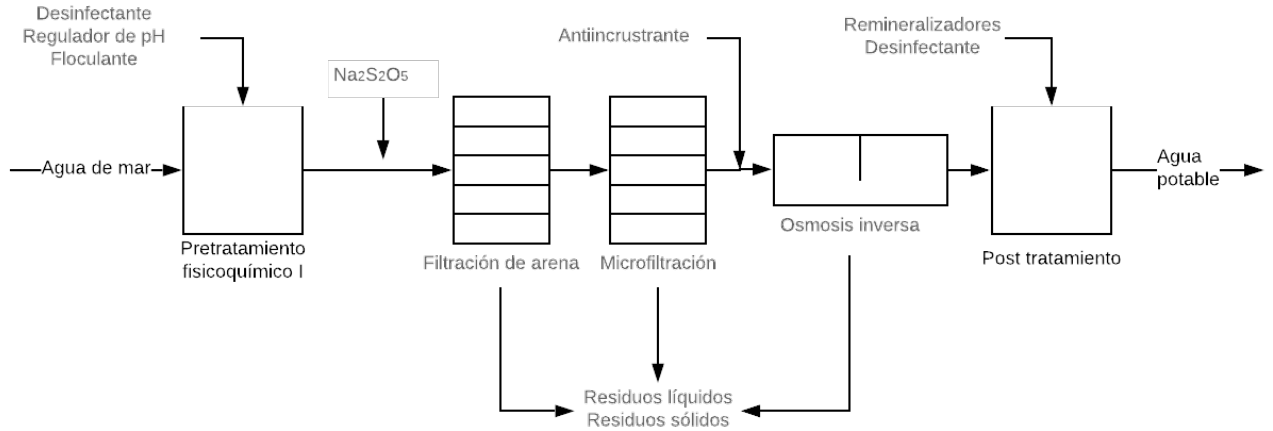


Figura 4.7: Proceso de desalinización para plantas nuevas. Elaboración propia a partir de información de referencia [76].

La diferencia de este tratamiento con el de la planta de Chañar, es que remineralización, se hace mediante la adición de $CaCO_2$ o CO_2 , y no con la mezcla con agua de pozo. Se escogió realizar el tratamiento completamente químico ya que la mezcla con agua de pozo requiere que no se añada más que el 15 % del agua desalada al agua remineralizada estándar, para poder cumplir con los requerimientos del agua potable [77]. Esta restricción le quita movilidad al sistema en cuanto a la disponibilidad actual del agua de pozo, por lo que se decidió implementar un sistema independiente de la disponibilidad de agua subterránea, sin embargo, la mayoría de las plantas instaladas en Chile hacen la remineralización mediante una mezcla con agua cruda, debido a que baja su costo de operación y de instalación.

Para establecer el costo de instalación de la planta, se buscó en bibliografía distintos costos a distintas escalas para poder encontrar una función de costo según la capacidad de cada planta. El cálculo de este costo se encuentra en Anexo F.3. Se llegó a dos ecuaciones, una lineal y otra no lineal. Si bien la ecuación no lineal es más realista ya que considera economías de escala, su implementación puede generar elevados tiempos de cómputo, por lo que se decide implementar la ecuación linealizada dada por la ecuación 4.1.

$$PlantCapC_{NP2} \left(\frac{MUSD}{\text{año}} \right) = 3,25 \cdot Q \left(\frac{m^3}{s} \right) + 0,65 \quad (4.1)$$

En la ecuación 4.1, Q se refiere al caudal de tratamiento de la planta en m^3/s , PlantCapC se refiere al Costo de Capitales o de Inversión anualizado, es decir, incluyendo la vida útil del proyecto, NP2 se refiere a que la planta estudiada tiene características de una planta potabilizadora de desalinización. A este costo no se le agrega el terreno ya que se incluye dentro de la función encontrada. El cálculo es explicado en el Anexo F. Así, las ecuaciones previamente mostradas pueden estar sobredimensionadas, ya que, en general, los grandes proyectos reinvierten en las obras para que su vida útil se extienda, sin embargo, esta nueva

inversión, pocas veces es igual o más grande que la inversión inicial.

4.5.2. Tratamiento de Agua Lluvia

La principal dificultad del tratamiento de agua lluvia es la instalación de cañerías para la recolección puesto que, en general, las alcantarillas que hay son para evitar inundaciones y aluviones, y no necesariamente para hacer uso directo del agua [78]. Es por esto, que este sistema tiene que incluir una recolección de lluvia distinta a la red actual. Este cálculo se ve en la sección 4.5.5. Así, existen dos sistemas de captación de agua lluvia: captación en ladera y captación en techo. Estos procesos se pueden observar en la Figura 4.8

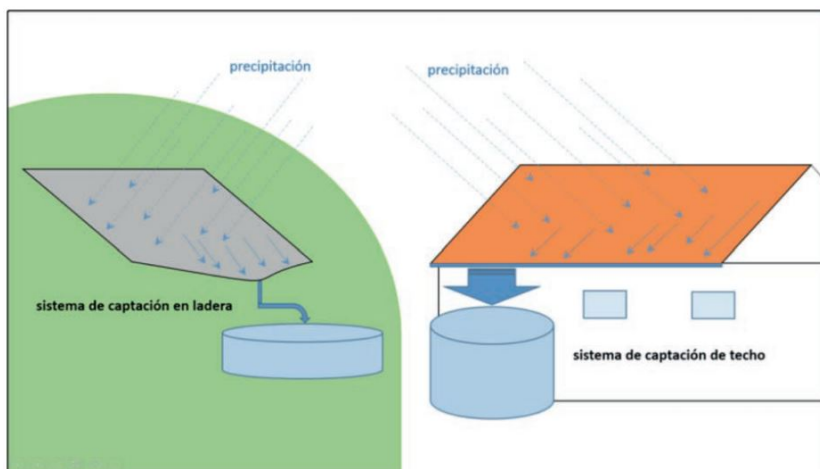


Figura 4.8: Técnicas para la captación de agua lluvia [59].

En el presente trabajo se propondrá sólo el sistema de captación de agua lluvia mediante ladera, que llega a una planta típica de tratamiento de agua lluvia, es decir, un pretratamiento, etapa de coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección mostrados en la Figura 4.9.

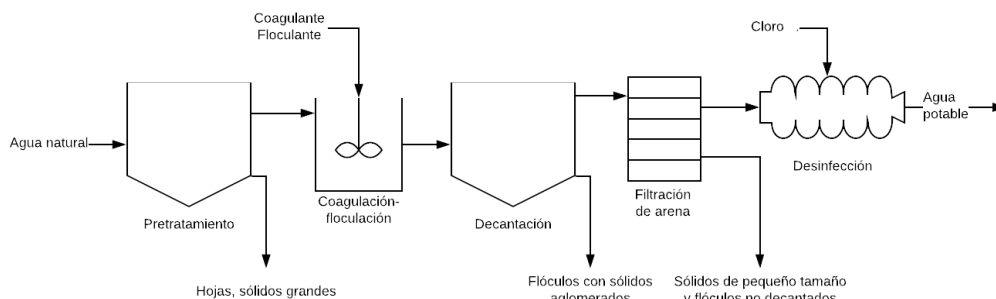


Figura 4.9: Proceso estándar de potabilización de agua. Elaboración propia a partir de información en referencia [47].

De acuerdo a lo presentado en el Anexo F se estima que el costo de instalar una nueva

planta de potabilización de agua estándar viene dado por:

$$PlantCapC_{NP3} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 1,71 \cdot 10^{-2} Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 5,75 \cdot 10^{-2} + Ter_i$$

En la ecuación anterior, Q corresponde al caudal, PlantCapC al costo de capitales anualizado, Ter_i al terreno y NP3 se refiere a que el tipo de planta estudiado corresponde a una planta de tratamiento de agua lluvia. Esta planta es igual a una planta convencional de tratamiento de agua de fuente natural, cuyo subíndice es NP1. A esto, se le debe agregar el costo de la instalación del sistema de captación de agua. En general, la captación de agua se hace con un sistema de ladera (véase Figura 4.8), lo cual implica utilizar una gran área de una ladera, para luego acumular el agua en un contenedor. Este trabajo considerará este sistema de captación asumiendo que no implica mayor costo la recolección de agua.

Para el costo de instalación de las cañerías se utilizó una estimación de la empresa Aguas Antofagasta S.A. y de Aguas Chañaral S.A., utilizando una tubería HDPE PE 100 PN 10 con un diámetro promedio de 1 metro [79] El costo de instalación de las tecnologías por metro lineal es de 13,3 [UF/m]. El cálculo se presenta en Anexo E.

4.5.3. Aguas residuales

En [14] se señalan varias tecnologías para potabilizar el agua sanitaria. Se selecciona una calidad potable que incluya cloración debido al bajo costo de esta tecnología para desinfectar y a que puede tratar caudales elevados [14]. Así, el diagrama de flujos del proceso se muestra en la Figura 4.10.

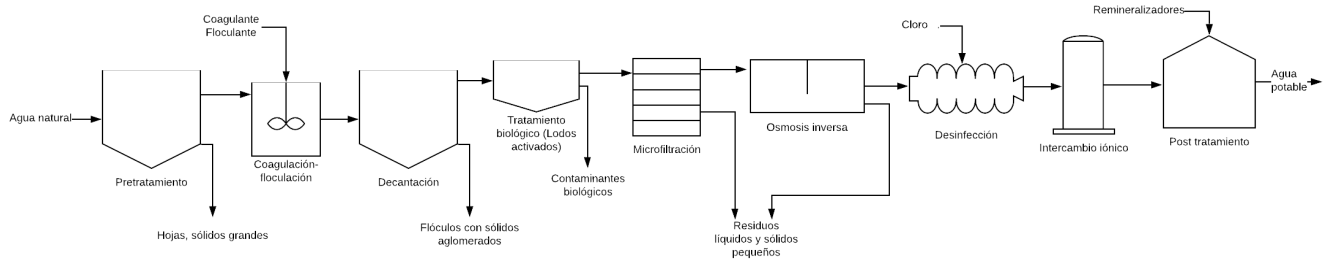


Figura 4.10: Diagrama de flujos de proceso de reciclaje de agua. Elaboración propia a partir de información en referencia [14].

Para este caso, se investigó el costo de instalación por tecnología. Esto se hizo en base a las investigaciones previas llevadas a cabo en [14]. Así, la ecuación para costo de instalación de esta planta es:

$$PlantCapC_{NW} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 5,19 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 3,29 + Ter_i$$

En la ecuación anterior, Q corresponde al caudal de tratamiento, $PlantCapC$ al costo de capital anualizado, Ter_i al costo de terreno y NW indica que la planta estudiada es una planta de tratamiento de aguas servidas nueva, con calidad de salida potable.

Por otro lado, se pueden modificar las plantas existentes, agregándole las tecnologías de microfiltración, osmosis inversa, desinfección e intercambio iónico. El costo de instalación de estas tecnologías a las plantas existentes es:

$$PlantCapC_{MW} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 2,88 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 3,15$$

En la ecuación anterior, Q corresponde al caudal de tratamiento, $PlantCapC$ al costo de capital anualizado y MW indica que la planta estudiada es una planta de tratamiento de aguas servidas modificada, con calidad de salida potable.

El desarrollo de ambos costos se muestran en Anexo F, en donde se designó una vida útil de 20 años. Este costo está sobredimensionado ya que los activos se pueden vender y recuperar el capital inicial o alargar la vida útil de la planta.

4.5.4. Costos de plantas de tratamientos

Costo de capital para plantas de tratamiento ($PlantCapC$)

El costo de instalación de las plantas de tratamiento se calcula según diversas metodologías:

- Plantas de tratamiento de agua potable convencional y de reciclaje: el costo de instalación se encontró buscando una función por cada tecnología en función del flujo de tratamiento. Luego se compuso un único costo de instalación sumando todos los costos individuales.
- Plantas desalinizadoras: para establecer este costo se buscó en bibliografía plantas desalinizadoras por osmosis inversa que se encontraran en Chile. Con esto, se creó una ecuación de costos en función del caudal de tratamiento.

La Tabla 4.1 presenta los costos de instalación anteriormente mencionados:

Tabla 4.1: Resumen costos de instalación de plantas.

Tipo de planta a instalar	Función de costo
PTAS nuevas	$\text{PlantCapC}_{NW} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 5,19 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 3,29 + Ter_i$
PTAS modificadas	$\text{PlantCapC}_{MW} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 2,88 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 3,15$
PTAP agua lluvia	$\text{PlantCapC}_{NP3} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 1,71 \cdot 10^{-2} Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 5,75 \cdot 10^{-2} + Ter_i$
PTAP agua de mar	$\text{PlantCapC}_{NP2} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 3,25 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 0,65$
PTAP tradicional	$\text{PlantCapC}_{NP1} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 1,71 \cdot 10^{-2} Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 5,75 \cdot 10^{-2} + Ter_i$

Los cálculos de estas ecuaciones se pueden encontrar en el Anexo F.

Los costos de terreno para instalación de nuevas plantas se calcularon asumiendo tamaños fijos para cada tipo de planta y uso de suelo tipo industrial inofensivo. El desarrollo del cálculo se encuentra en Anexo F.5.

Los parámetros finales para costos de terrenos según planta y ubicación se muestran en la Tabla F.6.

Tabla 4.2: Parámetros finales para costos de terreno

Planta	Región Antofagasta			Región Atacama		
	Terreno Tocopilla [USD/año]	Terreno El Loa [USD/año]	Terreno Antofagasta [USD/año]	Terreno Chañaral [USD/año]	Terreno Copiapó [USD/año]	Terreno Huasco [USD/año]
NP1 y NP3	551.925	376.275	727.500	752.625	351.225	551.925
NP2	919.875	627.125	1.212.500	1.254.375	585.375	919.875
NW	1.471.800	1.003.400	1.940.000	2.007.000	936.600	1.471.800

Costos operacionales de las plantas de tratamiento (*PlantOpC*)

Para calcular este costo se siguió el procedimiento utilizado para los estudios tarifarios. Se asumió que los costos básicos de cada planta serán similares para todas las plantas. Así, para obtener estos costos generales básicos se utilizaron los datos que se entregan en Aguas Chañar S.A., sin embargo, los datos de este estudio tarifario es para la empresa completa, por lo que para obtener los valores por planta, sólo se asumió que los costos son divididos de forma equitativa en cada planta [72]. A este costo se le puede denominar costo fijo.

Por otro lado, se tienen los costos específicos o variable, que se calcularon de distintas formas según el tipo de planta:

- Para una PTAP convencional se calculó una función de costos para los productos químicos y energía, según lo indicado en el estudio tarifario de Aguas Andinas S.A. Se utilizaron las plantas de El Canelo y Florida en la Región Metropolitana para obtener una ecuación lineal [80].
- Para una PTOI, se realizó el mismo procedimiento anterior pero con el estudio tarifario de empresas Chañar, ya que emplea plantas de osmosis inversa para su tratamiento de agua.
- Para una PTAS, se multiplicó por un factor el costo de la PTAP convencional. Esto, para considerar el costo de lodos activados y de tratamiento de éstos. Este factor es un supuesto importante, y se refiere a la energía requerida por los lodos activados y el posterior tratamiento de los desechos. Puede ser determinado con mayor exactitud.
- Para una PTAS de reciclaje, se le añadió el costo de osmosis inversa a una PTAS convencional y luego se multiplicó la ecuación por un factor para representar el costo operacional del intercambio iónico.

Los resultados para costos operacionales por planta se observan en la Tabla 4.3

Tabla 4.3: Costos operacionales por planta de tratamiento.

Planta	Función de costo
PTAS nuevas y modificadas	$\text{PlantOpC}_{NW,MW} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 5.126.850 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 701.316$
PTAP agua de mar nuevas y existentes	$\text{PlantOpC}_{EP2,NP2} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 4.646.261 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 700.594$
PTAS existentes	$\text{PlantOpC}_{EW} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 59.706 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 702.435$
PTAP convencional	$\text{PlantOpC}_{EP1,NP1,NP3} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 39.804 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 701.611$

El detalle de los cálculos de cada costo se pueden ver en el Anexo H.

4.5.5. Costos de red de agua

Costos de capital para la red de agua (*RedCapC*)

Para el costo de instalación de cañerías, se buscó el costo de colocación y pruebas, utilizando una tubería ejemplo de polietileno de alta densidad PE 100 PN 10 de 1 metro de diámetro. El costo de instalación final queda dado por la ecuación 4.2.

$$\text{RedCapC} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 9,13 \cdot \text{dist}_{prom,(i,j)}[m] \cdot E_i \forall i:\text{nueva planta de tratamiento} \quad (4.2)$$

En la ecuación 4.2, E_i corresponde a la existencia de la planta, pero no todas las plantas necesitarán instalación de cañería. Por ejemplo, si la solución óptima corresponde a instalar una nueva planta desalinizadora y eliminar una planta de potabilización que estaba

relativamente cerca, se puede instalar una cañería desde la planta desalinizadora hasta el punto de distribución más cercano, para luego unirse a la red existente. Una analogía similar es para las plantas de tratamiento de aguas servidas. Este supuesto conlleva a que se puede sub o sobre estimar el cálculo, ya que puede ser que una planta de tratamiento esté cerca de un punto de consumo, pero este cálculo indicará que el costo es mayor. Lo mismo pasaría si el punto de consumo está lejos y no tiene una red de abastecimiento cercana. Es por esto que se utiliza una distancia promedio $dist_{prom,(i,j)}$. El supuesto es útil para reducir los costos y no desmantelar las redes de agua existentes.

Para ver mas detalles revisar Anexo E.

Costos de operación para la red de agua (*RedOpC*)

Para este costo se utiliza el balance energético del sistema dado por la ecuación de Bernoulli [14]. Este costo se observa en la siguiente ecuación:

$$RedOpC = T \cdot E \cdot \sum_{j \in DN_i} \sum_i F_{i,j} \cdot \left(g \cdot (h_j - h_i) + f \cdot \frac{dist_{(i,j)} \cdot v^2}{2D} \right), \forall i \in U \quad (4.3)$$

En la ecuación G.1, T es el tiempo anual de operación, E el costo por unidad de electricidad, g la aceleración gravitacional, h_i la altura del nodo i y h_j la altura del nodo j , $dist_{(i,j)}$ la distancia entre el nodo i y el nodo j , v es la velocidad lineal, f el factor de Darcy, D el diámetro de la cañería y $F_{i,j}$ el flujo volumétrico desde el nodo i hasta el nodo j .

La ecuación G.1 es no lineal, y como se ha mencionado anteriormente se busca evitar lo más posible las no linealidades dentro de las ecuaciones, debido al elevado costo computacional que representan, es por esto que se decide linealizar utilizando un diámetro promedio de 1 [m] para las cañerías, obteniéndose la ecuación 4.4.

$$RedOpC = T \cdot E \cdot F_{i,j} \cdot \sum_{j \in DN_i} \sum_i (g \cdot (h_j - h_i) + dist_{(i,j)} \cdot 2,79), \forall i \in U \quad (4.4)$$

Para ver más detalles, revisar el Anexo G.

4.6. Discusiones

Lo estudiado en esta sección de sistemas de tratamiento de agua y sus características sirve para entender los procesos fisico-químicos que ocurren en cada etapa de los procesos y así establecer relaciones lógicas entre plantas, restricciones de flujos máximos de tratamiento o de ubicación de las plantas.

Las tecnologías que se seleccionaron para representar cada planta son coherentes con las usadas actualmente en Chile y otras partes del mundo.

Con respecto al análisis de los costos, tiene una importancia vital en el desarrollo de la memoria, debido a que se debe considerar el impacto económico en cualquier decisión que se quiera tomar. El principal problema de los costos encontrados es que no consideran economías de escala, siendo funciones lineales no representativas con la realidad. Sin embargo, considerar funciones no lineales aumenta el tiempo de cómputo en días o incluso semanas, por lo que no es viable ni conveniente el uso de estas funciones.

Por otro lado, para el costo de instalación de plantas, se siguió una metodología similar en todas las plantas, excepto para las plantas desalinizadoras, debido a la disponibilidad de información de cada tecnología. Esto puede generar discrepancias entre los valores adoptados para implementar cada planta. En particular, se tiene que las plantas desalinizadoras no tienen costo de terreno puesto que el costo de inversión encontrado ya contiene este ítem, lo que es un problema ya que los terrenos industriales tienen diferente costo dependiendo de la zona en que se encuentren.

Para el costo de operación de las plantas, se observa una elevada diferencia entre plantas que utilizan tecnología de osmosis inversa versus las que no. Este resultado no es de extrañar, y se debe principalmente al requerimiento energético de esta tecnología. Es por esto que sigue siendo relativamente caro producir agua desalada y se hace principalmente para empresas mineras, que tienen la capacidad adquisitiva de tratar estas aguas. Una posibilidad para disminuir estos costos de operación es instalar plantas de energía fotovoltaica, opción que muchas desalinizadoras utilizan, sobre todo en la zona norte del país.

El costo de instalación de cañerías también tiene un supuesto importante que corresponde al asumir una distancia promedio en lugar de la distancia real. Es difícil saber si este supuesto va a sub o sobredimensionar los costos, ya que una planta se puede conectar con otro nodo que esté más lejos o más cerca que esta distancia estimada. El considerar todas las distancias generaría costos superiores a los reales debido a que no se utilizarían las cañerías existentes.

Por otro lado, el costo de operación de la red, que se obtiene a través de una linealización de la ecuación de Bernoulli, también puede generar diferencias en los resultados, donde nuevamente se prefirió favorecer el tiempo de cómputo a mantener la ecuación original no lineal.

Si bien muchos costos incluyen supuestos importantes, permiten establecer una aproximación coherente para los valores reales, posibilitando el establecimiento de las restricciones en el problema de optimización, que luego serán consideradas para minimizar el costo total y para utilizar en la metodología de *Programación por Metas*.

Capítulo 5

Formulación del problema de optimización

Con toda la información recopilada en las secciones anteriores, es posible comprender cómo funciona la red de agua actualmente en los casos de estudio y qué nuevas tecnologías podrían aplicarse en cada región. Así, es posible plantear el problema de optimización siguiendo la siguiente metodología específica:

5.1. Metodología específica

A continuación se presentan los pasos que se siguieron para formular el problema de optimización:

- Se modeló la red actual de los casos de estudio como un grafo, indicando la división de los casos de estudio.
- Se creó la superestructura con las opciones de nuevas plantas de tratamiento. En esta sección fue importante dividir los casos de estudio en distintos distritos para poder representar los nodos como puntos geográficos en el mapa, para poder establecer distancias y costos de transporte.
- Se realizó un análisis de la situación base de los casos de estudio, es decir, establecimiento de consumos, pérdidas, porcentaje de estrés hídrico, etc. Esto se realizó con el objetivo de poder comparar los resultados posteriores con la situación actual.
- Se investigó la metodología de 'Programación por metas' para la resolución del problema multi-objetivo.
- Se detectaron y establecieron los conjuntos, parámetros y restricciones del problema de optimización.
- Finalmente, se formularon matemáticamente las funciones objetivo.

5.2. Superestructura

Para comenzar a plantear el problema de optimización, se analiza la situación actual del sistema de red de agua, que se puede visualizar mediante el grafo propuesto en la Figura 5.1. Se muestran las dos fuentes usuales de los casos de estudio: mar y fuentes naturales convencionales (cauces superficiales y aguas subterráneas). También, los principales consumos que pueden existir, dependiendo de las calidades requeridas (véase Capítulo 4). Adicionalmente, se encuentran las plantas de tratamiento de agua: potabilización y aguas servidas.

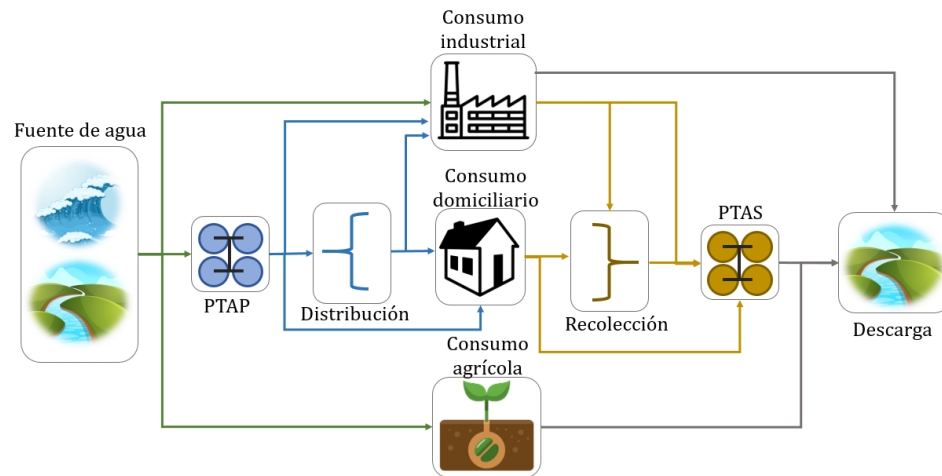


Figura 5.1: Grafo actual de un sistema regional de red de agua. Elaboración propia.

Se considera como fuente natural río y pozo para simplificar la comprensión del texto. Además, las plantas de potabilización pueden acceder a una red general de distribución de agua, dependiendo de las necesidades de cada planta [14]. Esto es análogo a las plantas de tratamiento de aguas servidas con redes generales de recolección [14]. Para cada caso de estudio existirán distintas plantas de tratamiento de agua potable y residual cuyas ubicaciones pueden verse en el Anexo K. Estas plantas se pueden o no conectar a plantas elevadoras, denominadas *PEAP* para las plantas elevadoras de agua potable y *PEAS* para plantas elevadoras de agua servida. Estas elevaciones se encuentran dentro de los conjuntos de distribución y recolección, respectivamente, ya que no son plantas de tratamiento, sino, bombas elevadoras de agua, para que el flujo pueda llegar a su destino.

El proceso anteriormente descrito puede verse modificado mediante la instalación de plantas de tratamiento que extraigan agua desde otras fuentes como una alternativa al estrés hídrico. Así, se puede plantear una nueva superestructura que incluya estas nuevas opciones dentro del sistema de aguas, observándose en la Figura 5.2 el grafo que representa la superestructura propuesta. La visualización de todas las soluciones posibles en una única estructura facilita la formulación del problema, aunque la solución final puede instalar o no las plantas de tratamiento propuestas.

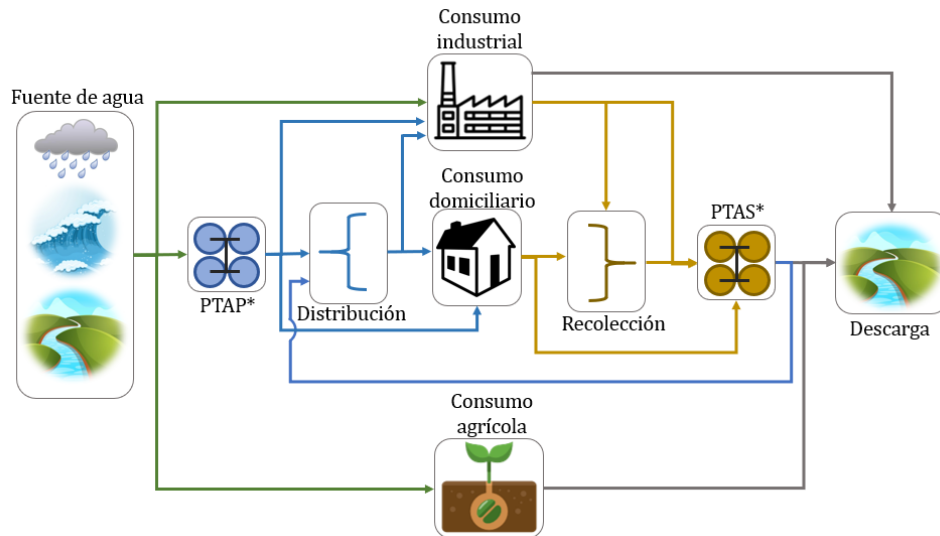


Figura 5.2: Grafo con nuevas opciones de tratamiento de agua y nuevas conexiones. Elaboración propia.

En la Figura 5.2, PTAP* y PTAS* implican las nuevas plantas de tratamiento de fuentes alternativas: lluvia, agua de mar y reciclaje de agua.

Para poder establecer los distintos nodos en el mapa, fue necesario dividir geográficamente los casos de estudio en sub-secciones [14], [21]. Las opciones de división fueron: por cuadrantes, por cuencas, y por provincias. La primera opción se refiere a dividir la ciudad en 4 espacios geográficas de áreas iguales. Esta opción es seguida en otros estudios previos [14], [21]. Hacer una división aleatoria dificulta la búsqueda de datos y el establecimiento del caso base de la ciudad, ya que la mayoría de los datos se encuentran asociados a una división geopolítica del territorio, por lo que se descartó esta opción de división. En el caso de la división por cuencas, le hubiese otorgado un mayor realismo que las otras dos opciones, ya que a mayor número de sub-secciones, más representado está el sistema desde un punto de vista de las simplificaciones de los consumos, o de redes de recolección/distribución, o de nuevas plantas. Sin embargo, esto también le otorga mayor complejidad al problema, pudiendo elevar de sobre manera el tiempo de cómputo [14]. Así, se decide dividir los casos de estudio por provincias, no sólo por simplicidad, si no que también para facilitar la toma de decisiones considerando que la presente memoria puede servir para planificar el uso de agua y la red hídrica de Chile. Esta división se muestra en los Anexos A y B, para Antofagasta y Atacama, respectivamente.

5.3. Modelo matemático

Para plantear el problema de optimización se deben tomar en cuenta las variables de decisión, los parámetros, restricciones, funciones objetivo y conjuntos a los cuales pertenecen las variables o parámetros [81]. Desde ahora en adelante los conjuntos representarán los nodos del grafo, es decir, se tendrán conjuntos de consumo, de fuentes de agua, de plantas de tratamiento y de sistemas de distribución y recolección.

El problema principal tiene dos funciones objetivo, una representando el indicador económico y la otra representando el indicador ambiental. Para este tipo de problemas multi-objetivo se utiliza la metodología de Programación por Metas para el desarrollo del problema.

La metodología de Programación por Metas o *GP* (por sus siglas en inglés *Goal Programming*) es una rama del análisis multi-objetivo [19]. Existen tres tipos de *GP*'s: lexicográfico, Chebyshev y ponderado [19]. El primero de ellos necesita tener una lista de prioridades de cada función objetivo del problema. El segundo introduce la noción de 'distancia' dentro de la Curva de Pareto como una desviación entre los valores ideales y los valores reales. Este tipo de metodología es usualmente llamada como 'Minmax GP'. Finalmente, la tercera variante es la de ponderación, en donde se minimizan las funciones objetivo ponderadas por un valor fijo, que ha sido normalizado para cada función [19].

Cada tipo de *GP* tiene ventajas y desventajas, sin embargo, en el presente trabajo se utilizará la programación por metas Chebyshev, debido a que es la metodología más apta cuando se requiere equilibrio entre los niveles de satisfacción de los objetivos, es decir, todas las funciones objetivo se acercarán a su punto ideal de una forma similar [19]. Para entender cómo funciona esta metodología, ver Anexo J.

A modo general, las variables de decisión son los flujos de la red y existencias de plantas de tratamiento. El modelo de optimización busca reducir el costo total y el flujo de extracción desde las fuentes de agua, respetando restricciones de balances volumétricos, límites de flujos, capacidades máximas de plantas de tratamiento, cumplimiento de demanda, entre otras.

A continuación, se muestran los conjuntos, variables, restricciones y funciones objetivo del problema.

5.3.1. Conjuntos

Los conjuntos del problema representan los distintos nodos que están presentes en la formulación. Estos se muestran en la Tabla 5.1. Los elementos de los conjuntos se muestran en el Anexo L.

Tabla 5.1: Conjuntos del modelo matemático

Conjunto	Descripción
R	Conjunto ficticio que representa la fuente de agua a partir de la lluvia ¹
FN	Fuente natural de agua, cursos superficiales o subterráneos
MR	Fuente ficticia que representa la fuente de agua a partir del mar ²
CD	Consumo domiciliario o residencial
CI	Consumo industrial. Incluye los subconjuntos de consumo industrial por provincia, consumo industrial particular y consumo minero
CA	Consumo agrícola

¹Se denomina ficticio pues no existe una fuente real de la lluvia que se pueda modelar como un punto fijo, sin embargo, el conjunto existe.

²Se denomina ficticio pues no existe una fuente real del mar que se pueda modelar como un punto fijo, sin embargo, el conjunto existe.

D	Redes de distribución. Incluyen las actuales PEAP y nuevos puntos de distribución en la red
C	Redes de recolección. Incluyen las actuales PEAS y nuevos puntos de recolección en la red
K	Punto de descarga de agua en la fuente natural
EP	Planta de tratamiento de agua potable existentes. Tiene los subconjuntos EP1 y EP2, que representan las PTAP existentes de tratamiento de agua natural y de desalinización, respectivamente
NP	Planta de tratamiento de agua potable nuevas. Tiene los subconjuntos NP1, NP2 y NP3, que representan las PTAP nuevas de tratamiento de agua natural, de desalinización, y de tratamiento de aguas lluvias, respectivamente
EW	Planta de tratamiento de agua servida existente
NW	Planta de tratamiento de agua servida nueva, cuya salida tiene calidad de agua potable
MW	Planta de tratamiento de agua servida modificada, cuya salida tiene calidad de agua potable. Se refiere a la modificación de las PTAS existentes, para lograr la calidad potable
S	Sumidero

Los conjuntos previamente mencionados tienen distintos elementos. La descripción de éstos se encuentran en Anexo L.

5.2.1.2. Variables

Las variables de decisión del problema de optimización multi-objetivo se muestran en la Tabla 5.2. La solución óptima decidirá valores y conexiones de flujos y existencias de plantas.

Tabla 5.2: Variables para el problema multi-objetivo

Variable	Descripción
$F_{i,j}$ [m^3/s]	Flujo de agua desde el nodo i hasta el nodo j .
E_i [-]	Existencia del nodo i . Esto cobra importancia en las plantas de tratamiento, debido a que se decidirá la instalación de nuevas plantas o desmantelación de las actuales.
γ [-]	Variable libre a minimizar mediante el método de programación por metas para un problema multi-objetivo. Esta variable representa la máxima desviación entre las funciones objetivo consideradas y las metas fijadas. Para más información ver Anexo J.
H_u [m^3/s]	Corresponde al flujo volumétrico que sale de una fuente de agua, cuyo destino no es un nodo de consumo o de pérdida.

5.3.2. Restricciones

Las restricciones definen el espacio factible en el cual se va a trabajar, por lo que su correcto planteamiento es un paso importante en el modelamiento matemático.

A continuación se muestran los distintos tipos de ecuaciones que definen las restricciones del problema.

- Balances de masa

Se asume que no es necesario hacer un balance de masa de los contaminantes, ya que todos los procesos garantizan la calidad de agua adecuada para distintos fines. Además, añadir la concentración como una variable extra, genera un problema inmediatamente no lineal, debido a la multiplicación de concentraciones y flujos para hacer el balance de masa por componentes, ralentizando con ello la resolución del problema. Si bien existen estrategias para abarcar el problema de los contaminantes de forma lineal, significaría un esfuerzo extra probablemente innecesario, ya que según el trabajo expuesto por onthenecessaryconditions, para un problema de planificación sobre asignación de agua ('WAP' por sus siglas en inglés *Water Allocation Planning*), la solución óptima para las concentraciones de salida de contaminantes en cada nodo será máxima [82]. Así, la concentración de salida de cada nodo será un parámetro, determinado como el máximo valor permitido por ley.

También se asume estado estacionario en todos los procesos considerados y en la misma red, y se utilizan valores promedios para las precipitaciones de cada elemento considerado en el conjunto R , en lugar de utilizar una distribución de probabilidades para caracterizar las precipitaciones, con el objetivo de simplificar el cálculo.

Finalmente, se asume densidad constante en todos los flujos (conexiones), por lo que se puede realizar un balance volumétrico que, en este caso, se considera igual al balance másico.

Balance de masa en fuentes naturales

Se asume que existe una salida, H_u , en las fuentes de agua, que pueden ir a otras fuentes de agua o ser absorbidas por el terreno, dado por las características de las zonas arceicas y endorreicas que están presentes en la zona norte de Chile. En el balance volumétrico, se incluye la entrada de agua por lluvia y por flujos que entran de diversas fuentes tales como depósitos de empresas o plantas de tratamiento de aguas servidas. Por otro lado, para las salidas de agua, se incluye extracción de agua para consumo (PTAP y consumo agrícola), la salida H_u y pérdidas por infiltración, consumos no considerados, evaporación, etc. Este balance es dado por la ecuación 5.1, en donde i representa la fuente natural, ON_i representa al conjunto de nodos de origen que descargan sus flujos en la fuente i , R corresponde al nodo ficticio de fuente de lluvia, DN_i representa al conjunto de nodos de destino de i , es decir, los consumos de esa fuente y S corresponde al nodo de sumidero.

$$\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} + \sum_{r \in R} F_{r,i} = \sum_{j \in DN_i} F_{i,j} + \sum_{s \in S} F_{i,s} + H_u, \forall i \in FN \quad (5.1)$$

Cabe destacar que la fuente natural será también en donde se descarguen los flujos del sistema completo. Esta característica se encuentra explicada en el Anexo I.

Balance de masa en PTAP existentes

Las plantas de potabilización existentes se clasifican en desalinización y tratamiento de agua subterránea o superficial. Este último será análogo a tratamiento de fuente natural, sin pérdida de generalidad. Así, el balance de masa para el tratamiento de agua de fuente natural viene dado por la ecuación 5.2.

$$\sum_{f \in FN} F_{f,i} = \sum_{cd \in CD} F_{i,cd} + \sum_{ci \in CI} F_{i,ci} + \sum_{ca \in CA} F_{i,ca} + \sum_{d \in D} F_{i,d} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \forall i \in EP1 \quad (5.2)$$

Por otro lado, el balance de masa para desalinizadoras está dado por la ecuación 5.3

$$\sum_{mr \in MR} F_{mr,i} = \sum_{cd \in CD} F_{i,cd} + \sum_{ci \in CI} F_{i,ci} + \sum_{ca \in CA} F_{i,ca} + \sum_{d \in D} F_{i,d} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \forall i \in EP2 \quad (5.3)$$

Balance de masa en PTAP nuevas

Las plantas de potabilización nuevas se clasifican en desalinización, tratamiento de fuente natural o tratamiento de agua lluvia. Los flujos de salidas de todas las plantas se dirigen a los respectivos consumidores que requieran el agua, o a distribución.

El balance de masa para el tratamiento de fuente natural viene dado por la ecuación 5.4

$$\sum_{f \in FN} F_{f,i} = \sum_{cd \in CD} F_{i,cd} + \sum_{ci \in CI} F_{i,ci} + \sum_{ca \in CA} F_{i,ca} + \sum_{d \in D} F_{i,d} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \forall i \in NP1 \quad (5.4)$$

Por otro lado, el balance de masa para las nuevas desalinizadoras se presenta en la ecuación 5.5

$$\sum_{mr \in MR} F_{mr,i} = \sum_{cd \in CD} F_{i,cd} + \sum_{ci \in CI} F_{i,ci} + \sum_{ca \in CA} F_{i,ca} + \sum_{d \in D} F_{i,d} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \forall i \in NP2 \quad (5.5)$$

Finalmente, el balance de masa para el tratamiento de agua lluvia está dado por la ecuación 5.6

$$\sum_{r \in R} F_{r,i} = \sum_{cd \in CD} F_{i,cd} + \sum_{ci \in CI} F_{i,ci} + \sum_{ca \in CA} F_{i,ca} + \sum_{d \in D} F_{i,d} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \forall i \in NP3 \quad (5.6)$$

Balance de masa en puntos de distribución

Los nodos de distribución corresponden a puntos en el mapa que representan *PEAP* existentes, o nuevos puntos donde el agua potable se junte para una mejor distribución en la red (llamados desde ahora, puntos de distribución o *D*). Una red de distribución real significaría modelar las cañerías y tuberías actuales, sin embargo, esto genera una complicación mayor debido a que estas redes pueden cambiar en el tiempo y, además, se deberían añadir un elevado número de puntos en el mapa, realizando el balance de masa en cada uno de esos puntos, lo que genera un problema con más restricciones y, por lo tanto, un aumento en el costo computacional. Sin embargo, el uso de estos puntos significa el poder acortar distancias entre nodos para luego no sobrestimar los costos de operación de la red.

Los flujos entrantes al sistema corresponden a los que vienen desde las plantas de potabilización, desde las plantas de tratamiento de agua residual con calidad de agua potable y desde las plantas potabilizadoras de aguas lluvias. Los flujos que salen se dirigen a los distintos consumos que requieren agua potable. Esto se ve reflejado en la ecuación 5.7.

$$\begin{aligned} \sum_{ep \in EP} F_{ep,i} + \sum_{nw \in NW} F_{nw,i} + \sum_{mw \in MW} F_{mw,i} + \sum_{l \in L} F_{l,i} + \sum_{np \in NP} F_{np,i} = \sum_{cd \in CD} F_{i,cd} + \\ \sum_{ci \in CI} F_{i,ci} + \sum_{ca \in CA} F_{i,ca} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \quad \forall i \in D \end{aligned} \quad (5.7)$$

Balance de masa en consumidores

Para los conjuntos de consumo se asume estado estacionario, en donde todas las pérdidas se encontrarán en el conjunto de *Sumidero* o 'S'.

El consumo industrial y el consumo agrícola pueden recibir agua desde la lluvia o de fuentes naturales (excluyendo mar), además de tener la posibilidad de consumir agua potable. Por otro lado, al consumo domiciliario sólo ingresa agua potable.

Así, el balance de masa para el consumo agrícola está dado por la ecuación 5.8, mientras que para el conjunto de consumo industrial está dado por la ecuación 5.9. Por otro lado, el balance para el consumo domiciliario se representa en la ecuación 5.10.

$$\sum_{f \in FN} F_{f,i} + \sum_{nw \in NW} F_{nw,i} + \sum_{mw \in MW} F_{mw,i} + \sum_{np \in NP} F_{np,i} + \sum_{ep \in EP} F_{ep,i} + \sum_{d \in D} F_{d,i} = \sum_{k \in K} F_{i,k}, \quad \forall i \in CA \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} \sum_{f \in FN} F_{f,i} + \sum_{nw \in NW} F_{nw,i} + \sum_{mw \in MW} F_{mw,i} + \sum_{ep \in EP} F_{ep,i} + \sum_{np \in NP} F_{np,i} + \sum_{d \in D} F_{d,i} = \sum_{k \in K} F_{i,k} + \sum_{c \in C} F_{i,c} + \\ \sum_{ew \in EW} F_{i,ew} + \sum_{nw \in NW} F_{i,nw} + \sum_{mw \in MW} F_{i,mw}, \quad \forall i \in CI \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned}
\sum_{nw \in NW} F_{nw,i} + \sum_{mw \in MW} F_{mw,i} + \sum_{np \in NP} F_{np,i} + \sum_{ep \in EP} F_{ep,i} + \sum_{d \in D} F_{d,i} = \sum_{c \in C} F_{i,c} + \sum_{ew \in EW} F_{i,ew} + \\
\sum_{nw \in NW} F_{i,nw} + \sum_{mw \in MW} F_{i,mw}, \forall i \in CD
\end{aligned} \tag{5.10}$$

Balance de masa en puntos de recolección

De manera análoga a la distribución, el conjunto de recolección representa a *PEAS* existentes, o nuevos puntos donde el agua servida es recolectada para luego ser enviada a la respectiva planta de tratamiento (estos puntos serán llamados desde ahora puntos de recolección o *R*). El razonamiento para la selección de estos puntos es similar al de la red de distribución, donde una representación totalmente realista implicaría un elevado tiempo de resolución. Sin embargo, el uso de estos puntos significa el poder acortar distancias entre nodos para luego no sobrestimar los costos de operación de la red.

Se asume que en estos nodos no hay acumulación, en donde los flujos entrantes al sistema corresponden a los que vienen desde los distintos consumos. Los flujos que salen se dirigen a las distintas plantas de tratamiento de agua servida.

Lo anterior se ve reflejado en la ecuación 5.11

$$\sum_{ci \in CI} F_{ci,i} + \sum_{cd \in CD} F_{cd,i} = \sum_{nw \in NW} F_{i,nw} + \sum_{ew \in EW} F_{i,ew} + \sum_{mw \in MW} F_{i,mw} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \forall i \in C \tag{5.11}$$

Balance de masa en PTAS existentes

Para las PTAS existentes se asume estado estacionario, las entradas corresponden a los flujos provenientes de los distintos consumos y de recolección, mientras que los flujos de salida se dirigen a descarga.

Así, el balance de masa para las PTAS existentes se muestra en la ecuación 5.12

$$\sum_{ci \in CI} F_{ci,i} + \sum_{cd \in CD} F_{cd,i} + \sum_{c \in C} F_{c,i} = \sum_{k \in K} F_{i,k} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \forall i \in EW \tag{5.12}$$

Balance de masa en PTAS nuevas

Las PTAS nuevas tendrán las mismas entradas que las existentes, sin embargo, su flujo de salida tendrá calidad potable, por lo que puede ser ingresada a la distribución o a los distintos

consumos. Así, el balance de masa para las PTAS nuevas viene dada por la ecuación 5.13

$$\sum_{ci \in CI} F_{ci,i} + \sum_{cd \in CD} F_{cd,i} + \sum_{c \in C} F_{c,i} = \sum_{cd \in CD} F_{i,cd} + \sum_{ci \in CI} F_{i,ci} + \sum_{ca \in CA} F_{i,ca} + \sum_{d \in D} F_{i,d} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \forall i \in NW \quad (5.13)$$

Balance de masa en PTAS modificadas

Las PTAS modificadas son las mismas plantas de tratamiento que existen pero que se modifican para que la calidad del flujo de salida sea apta para consumo humano. Así, el balance de masa para este nodo se muestra en la ecuación 5.14

$$\sum_{ci \in CI} F_{ci,i} + \sum_{cd \in CD} F_{cd,i} + \sum_{c \in C} F_{c,i} = \sum_{cd \in CD} F_{i,cd} + \sum_{ci \in CI} F_{i,ci} + \sum_{ca \in CA} F_{i,ca} + \sum_{d \in D} F_{i,d} + \sum_{s \in S} F_{i,s}, \forall i \in MW \quad (5.14)$$

- Cumplimiento de demanda

En esta sección, se asume que se cubrirá toda la demanda de cada región, y no sólo los territorios operacionales de las empresas sanitarias, ya que se busca la configuración óptima para reducir la escasez de agua en toda la región. Así, la ecuación 5.15 muestra el cumplimiento de la demanda, en donde p corresponde al nodo de origen del flujo que se dirige al nodo i , ON_i es el conjunto de los nodos de origen que están conectados con i , es decir, el conjunto en el que se encuentra p , $DM_{i,q}$ representa a la demanda de cada nodo i que se encuentra en el cuadrante q y (CT_i) es el cuadrante donde se encuentra i .

$$\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} \geq DM_{i,q}, \forall i = \text{Nodos de consumo}, \forall q \in CT_i \quad (5.15)$$

Como la restricción anterior solo impone una cota mínima para los flujos, y para obtener el valor anti-ideal en el problema multi-objetivo se impone una maximización de estos, el valor resultante podría ser infinito. Por este motivo, se establece una cota superior sobre el flujo total de agua extraído, la que representa cuanto más se puede entregar al nodo i sobre su demanda. Esto se refleja en la ecuación 5.16, donde CS es un parámetro que representa la holgura que podría existir en el caso de extracción de agua para el consumo.

$$\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} \leq DM_{i,q} + CS, \forall i = \text{Nodos de consumo}, \forall q \in CT_i \quad (5.16)$$

- Capacidad de planta de tratamiento

Las plantas de tratamiento actuales tienen cierta capacidad de diseño. Se asume que, en la realidad, pueden tratar un flujo similar a la capacidad diseñada, pero no necesariamente

igual [14]. Así, para plantas de tratamiento de agua servida y potable, el flujo de tratamiento varía según la época del año, sin embargo, esta variación no implica una ampliación de la planta. Así, el flujo máximo que puede tratar una planta, será el que trata actualmente en la época de verano, en donde se consume (y desecha) más agua, mientras que la mínima capacidad de tratamiento será el flujo que trata la planta en la época de invierno [14]. Se definen los porcentajes de cada variación como -15 %, para el caso del flujo en invierno, y +23 %, para el caso del flujo del verano [72]. En el caso de que el flujo que ingrese a la planta sea menor, se asume que no es rentable su tratamiento, por lo que la planta no existe y el flujo debe ser redireccionado a otra planta. Por otro lado, si el flujo que ingresa es mayor, entonces se asume que no puede ser tratado ya que excede la capacidad de la planta. En este caso el flujo también debe ser redireccionado.

Lo anterior se ve reflejado en las ecuaciones 5.17 y 5.18 para las plantas de tratamiento de aguas servidas, mientras que para el tratamiento de agua potable se tienen las ecuaciones 5.19 y 5.20, donde ON_i corresponden a los nodos de origen de i , DN_i a los nodos de destino de la planta i , AF_i corresponde al flujo actual de tratamiento de i y E_i es una variable binaria que representa la existencia de la planta i .

$$\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} \geq 0,85 \cdot AF_i \cdot E_i, \forall i \in \{EW \cup MW\} \quad (5.17)$$

$$\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} \leq 1,23 \cdot AF_i \cdot E_i, \forall i \in \{EW \cup MW\} \quad (5.18)$$

$$\sum_{p \in DN_i} F_{i,p} \geq 0,85 \cdot AF_i \cdot E_i, \forall i \in EP \quad (5.19)$$

$$\sum_{p \in DN_i} F_{i,p} \leq 1,23 \cdot AF_i \cdot E_i, \forall i \in EP \quad (5.20)$$

- Relaciones lógicas de existencia

Existen algunas relaciones lógicas de existencia, por ejemplo, si la planta no existe, entonces los flujos de tratamiento de esa planta debe ser cero. Lo anterior se cumple al imponer la restricción 5.18, para el caso de PTAS existentes, y 5.20, para las PTAP existentes. En el caso de las plantas nuevas, se debe emplear el método de *Big M* [83]. Esto indica que existe un parámetro de valor muy grande (M), mayor a todos los flujos tratados, que no tiene influencia en los resultados finales. Lo anterior indica que sólo sirve para establecer una relación entre la existencia de la planta y su flujo de tratamiento según las ecuaciones 5.21, para las PTAP nuevas, y 5.22, para las PTAS nuevas, donde ON_i corresponde a los nodos de origen de i , DN_i corresponde a los nodos de destino de i , E_i representa a la existencia de

la planta i , y M es el parámetro que indica el método de *Big M*.

$$\sum_{j \in DN_i} F_{i,j} \leq M \cdot E_i, \forall i \in NP \quad (5.21)$$

$$\sum_{j \in ON_i} F_{j,i} \leq M \cdot E_i, \forall i \in NW \quad (5.22)$$

Adicionalmente, existe una relación de coexistencia lógica de las plantas: si una planta existente es modificada, entonces la planta original ya no existe, si no que existe su versión mejorada, es decir, existe un cambio de conjunto. Esto se ve reflejado en la ecuación 5.23

$$\sum_{i \in \{EW \cup MW\}} E_i \leq 1 \quad (5.23)$$

- Barrera humana

En el caso de las plantas de tratamiento de aguas servidas, una de las barreras más importantes es la cultural. La gente tiene percepciones y creencias que, agregado al desconocimiento de los tratamientos de agua, hacen que el reuso directo de agua sea poco utilizado en el mundo [84]. Para esto, se agregan la restricciones dadas por las ecuaciones 5.24 y 5.25. Ambas indican que el flujo que sale de las plantas de tratamiento de aguas servidas, nuevas o modificadas, debe mezclarse en una cierta razón antes de dirigirse a algún consumo.

$$\sum_{c \in \{CD \cup CI \cup CA\}} F_{i,c} \leq BH1_c \cdot \left(\sum_{j \in \{EP, NP, NW, MW, D\}} \sum_{c \in \{CD \cup CI \cup CA\}} F_{j,c} \right) \quad (5.24)$$

$\forall i \in \{NW \cup MW\}, BH_c \in [0, 1], c \in \{CD \cup CI \cup CA\}$

$$\sum_{d \in D} F_{i,d} \leq BH2_d \cdot \left(\sum_{j \in \{EP, NP, NW, MW\}} F_{i,j} \right) \forall i \in \{NW \cup MW\}, BH_d \in [0, 1], d \in D \quad (5.25)$$

En la ecuación 5.24, $BH1_c$ corresponde a la barrera humana, es decir, al porcentaje máximo que el consumo 'c' acepta recibir y , en la ecuación 5.25, $BH2_d$ es la segunda barrera humana relacionada al porcentaje de mezcla de agua reciclada con agua potable desde otras fuentes, y que puede ser distinta a $BH1_c$.

- Límites de flujos

Máximo de precipitaciones

El origen de la lluvia (que es ficticio, ya que no tiene un origen fijo, sin embargo, el conjunto existe), se toma en el mapa como distintas estaciones de medición de precipitaciones. Como son varias, se decidió tomar sólo las que midieran un promedio mayor a 50 mm/año y, además, a las que estuvieran cercanas a los ríos, para disminuir el número de puntos a poner en el mapa, buscando reducir posibles alzas en el costo computacional, reducir errores asociados a la variación en las lluvias y asegurar una precipitación promedio mínima.

Así, estas estaciones miden un promedio anual, por lo que el aporte de las lluvias a distintos destinos como fuentes de agua y plantas de tratamiento de aguas lluvias es limitado. Lo anteriormente descrito se ve reflejado en la ecuación 5.26, donde DN_r son los destinos de las lluvias, es decir, fuentes y plantas de tratamiento de aguas lluvias, y MAX_r corresponde al parámetro que representa el caudal máximo medido por las estaciones de monitoreo.

$$\sum_{j \in DN_r} F_{r,j} \leq MAX_r, \forall r \in R \quad (5.26)$$

Flujo de agua subterránea

Existe un aporte del caudal que tiene la fuente subterránea y que se extrae desde distintos consumos, sin embargo, esto no está considerado dentro de los límites del aporte entregado por las lluvias, ya que es un flujo que está conectado con otros caudales subterráneos con una complejidad diferente a las interacciones de las fuentes subterráneas. Como no se sabe el valor real del caudal de las fuentes subterráneas, se asume un máximo valor que estas pueden llevar como flujo base. Además, como este flujo es resultante de la interacción de otros factores que no necesariamente corresponden a aportes de plantas de tratamiento o lluvias, entonces se asume un 'origen' de los flujos de las fuentes subterráneas 'i', $ONFS_i$. Este origen es ficticio y sólo se utiliza para modelar un posible ingreso a las fuentes subterráneas estudiadas que no corresponden a los aportes realizados por los otros nodos ya mencionados.

Así, lo anteriormente descrito se puede representar mediante la ecuación 5.27, donde $ONFS_i$ corresponde al origen ficticio descrito anteriormente y MAX_i al máximo que puede aportar este nodo ficticio. Este último parámetro se determina mediante el balance de masa del caso base, y analizando cuanto es el flujo que actualmente se extrae desde fuentes subterráneas.

$$\sum_{j \in ONFS_i} F_{j,i} \leq MAX_i, \forall i \in FN \mid i : \text{fuente subterránea} \quad (5.27)$$

- *Water Flow Regulation Service*

Existe un impacto ecológico al manipular las fuentes naturales para la extracción o para la deposición de RILes. Este impacto puede ser medido a través del indicador ambiental *Water Flow Regulation Service* o WC por sus siglas en inglés, que incluye la influencia de sistemas

naturales en la regulación de flujos hidrológicos, en donde en un ciclo regulado no existen excesos ni sequía de agua en los distintos caudales [85].

Este indicador se muestra en la ecuación N.1, eonde WC es el indicador ambiental, Hu' es el agua acumulada (mm/año), R es el flujo anual (mm/año), P es la precipitación anual (mm/año) y ET_C la evapotranspiración promedio anual (mm/año) [85].

$$WC = \frac{Hu'}{R} = \frac{Hu'}{P - ET_C} \quad (5.28)$$

Para encontrar la acumulación se sigue la ecuación 5.1, pero se debe hacer un cambio de unidades para poder establecer correctamente una acumulación como caudal. Estos cálculos se encuentran en el Anexo N, llegando a la ecuación 5.29 que es equivalente a la ecuación 5.30, donde WC es el indicador ambiental, $F_{p,i}$ los flujos que descargan en la fuente, $F_{r,i}$ los aportes de la lluvia, $F_{i,j}$ los flujos de extracción de distintas plantas y consumos, $F_{i,s}$ los flujos que representan pérdidas y *factoretc* el porcentaje que representa las pérdidas de evapotranspiración dentro de las pérdidas totales.

$$WC = \left(\frac{\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} + \sum_{r \in R} F_{r,i} - \sum_{j \in DN_i} F_{i,j} - \sum_{s \in S} F_{i,s}}{\sum_{r \in R} F_{r,i} - \text{factoretc} \cdot \sum_{s \in S} F_{i,s}} \right), \forall i \in FN \quad (5.29)$$

$$WC = \left(\frac{H_u}{\sum_{r \in R} F_{r,i} - \text{factoretc} \cdot \sum_{s \in S} F_{i,s}} \right), \forall i \in FN \quad (5.30)$$

Así, un sistema equilibrado es aquel en el cual el denominador del indicador ambiental se asemeja lo más posible al numerador, en otras palabras, cuando WC es lo más similar a 1.

La restricción a utilizar es el indicador anterior ligeramente modificado. La idea de un sistema estable es que se regule naturalmente y, en lo posible sin la intervención humana. Es por esto que se modifica la función de WC , haciendo que la diferencia entre el numerador y denominador sea un parámetro lo más similar a 0. Esto se hizo porque tratar restas es más simple que tratar divisiones, y la idea del indicador se mantiene. Además el sustraendo (anterior denominador) se fijó como un parámetro, que representa el valor actual de lluvias que caen sobre los ríos y pérdidas actuales que sufren los mismos. Así, la función que representa una restricción ambiental queda definida por las ecuaciones 5.31 y 5.32, donde $(F_{r,i})^*$ y $(F_{i,s})^*$ representan los parámetros de lluvias y pérdidas actuales, y DM corresponde al parámetro que representa la diferencia máxima permitida para el indicador, el cual se fijó como un valor similar a 0.

$$\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} + \sum_{r \in R} F_{r,i} - \sum_{j \in DN_i} F_{i,j} - \sum_{s \in S} F_{i,s} - \sum_{r \in R} (F_{r,i})^* - \text{factoretc} \cdot \sum_{s \in S} (F_{i,s})^* \geq -DM \quad (5.31)$$

$$\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} + \sum_{r \in R} F_{r,i} - \sum_{j \in DN_i} F_{i,j} - \sum_{s \in S} F_{i,s} - \sum_{r \in R} (F_{r,i})^* - \text{factoretc} \cdot \sum_{s \in S} (F_{i,s})^* \leq DM \quad (5.32)$$

La restricción ambiental se representa a través de dos ecuaciones ya que no se sabe si el valor de la suma y resta será positiva o negativa, por lo que se acota para ambos signos.

- Costos

Los costos están divididos en costos operacionales (*OpC*) y costos de capitales (*CapC*). Dentro de los costos operacionales están los costos de red (*RedOpC*) y los costos de cada planta (*PlantOpC*). Por otro lado, el costo de capitales incluye el costo de instalación de algunas cañerías (*RedCapC*) y costo de instalación de plantas nuevas y modificadas (*PlantCapC*). El resumen de estos costos se encuentra en la tabla 5.3. En el Anexo F se encuentra el desarrollo del costo de instalación de las plantas; en el Anexo E se encuentra el desarrollo del costo de instalación de las cañerías; en el Anexo G se encuentra el desarrollo del costo de operación de la red; y para el desarrollo del costo de operación de las plantas ver el Anexo H.

Tabla 5.3: Resumen de costos

Tipo de costo	Tipo de planta	Ecuación
RedCapC	-	$RedCapC \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 9,13 \cdot \text{dist}_{(i,j)}[m] \cdot E_i \cdot E_j, \forall i \in U, \forall j \in DN_i$
RedOpC	-	$RedOpC = T \cdot E \cdot F_{i,j} \cdot \sum_{j \in DN_i} \sum_i (g \cdot (h_j - h_i) + \text{dist}_{(i,j)} \cdot 2,79), \forall i \in U$
PlantCapC	NW	$PlantCapC_{NW} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 5,19 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 3,29 + Ter_i$
PlantCapC	MW	$PlantCapC_{MW} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 2,88 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 3,15$
PlantCapC	NP3	$PlantCapC_{NP3} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 1,71 \cdot 10^{-2} Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 5,75 \cdot 10^{-2} + Ter_i$

PlantCapC	NP2	$PlantCapC_{NP2} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 3,25 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 0,65$
PlantCapC	NP1	$PlantCapC_{NP1} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 1,71 \cdot 10^{-2} Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 5,75 \cdot 10^{-2} + Ter_i$
PlantOpC	NW	$PlantOpC_{NW} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 5.126.850 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 701.316$
PlantOpC	MW	$PlantOpC_{MW} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 5.126.850 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 701.316$
PlantOpC	NP2	$PlantOpC_{NP2} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 4.646.261 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 700.594$
PlantOpC	EP2	$PlantOpC_{EP2} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 4.646.261 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 700.594$
PlantOpC	NP1	$PlantOpC_{NP1} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 39.804 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 701.611$
PlantOpC	NP3	$PlantOpC_{NP3} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 39.804 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 701.611$
PlantOpC	EP1	$PlantOpC_{EP1} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 39.804 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 701.611$
PlantOpC	EW	$PlantOpC_{EW} \left[\frac{USD}{\text{año}} \right] = 59.706 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 702.435$

5.3.3. Parámetros

Los parámetros dependen de cada caso de estudio y fue necesario analizar el caso base, para lo cual se realizó el balance de masa de la situación actual. Así, muchos de los parámetros están basados en el caso actual de cada región: el balance de masa puede arrojar datos como caudales de tratamiento, consumos por nodos, caudales de extracción, entre otros.

Para calcular los parámetros en torno al caso base se tomaron los siguientes supuestos:

- Se asume que el principal aporte a las fuentes naturales será por precipitaciones. Además se realiza sólo el balance en las fuentes naturales superficiales, ya que las subterráneas no están completamente estudiadas y realizar el balance sobre ellas escapa al alcance de la memoria. Sin embargo, existen plantas de tratamiento que extraen agua subterránea, en donde se consideró que su capacidad de extracción era el máximo posible según la ecuación 5.27.
- Para calcular el promedio de precipitaciones se descargaron los datos de los reportes meteorológicos de precipitaciones mensuales desde el año 2009 hasta el año 2019 de la Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea de la Dirección General de Aguas [31]. Luego se ubicaron las estaciones de mediciones que estaban cercanas a cada río seleccionado para los casos de estudio. Así, estas estaciones representan el agua caída por precipitación.
- Para el balance de masa en las fuentes naturales se considera la entrada por precipitación, las descargas a los cauces por parte de distintas empresas sanitarias, la extracción de distintas empresas potabilizadoras o consumos, la pérdida por infiltración o evaporación y la posible salida que tenga el río en el mar o en otro río.
- Para calcular los consumos se siguió la metodología mencionada en la sección 3.3.2 del cuerpo de la memoria.
- Las redes de distribución y recolección existentes (PEAP y PEAS, respectivamente) se ubicaron en el mapa y, dependiendo si estaban cerca de un consumo o una PTAP/PTAS, se decidió su uso o no. No existe información al respecto del estado de los nodos actuales de distribución o recolección, por lo que no se sabe si siguen todos operativos. La reactivación de estos puntos podría implicar algún costo. La ubicación de estos nodos se solicitaron en el Portal de Transparencia.
- Para las plantas PTAS y PTAP existentes (EP y EW, respectivamente), se asumió que abastecerían sólo a los terrenos operacionales de las distintas empresas sanitarias. Así, si existían consumos fuera de los territorios operacionales, las plantas actuales no se conectarían a esos consumos debido a que no tienen la obligación y capacidad de hacerlo. Además, se consideraron conexiones cercanas entre plantas y consumos o redes de distribución/recolección. Con estas decisiones se llegó a un índice de escasez hídrica de 0,91, muy cercano al dado por el Banco Mundial el 2011 de 0,92 aprox. [8]. Este índice de escasez se determinó como [2]:

$$\text{Índice}_{\text{escasez-hídrica}} = \frac{\text{Consumo}}{\text{Oferta}} \cdot 100\%$$

- Los porcentajes de pérdidas de cada nodo se asumieron similares a porcentajes encontrados en referencia o asumiendo similitudes con pérdidas en otros nodos [14] [21].

Por otro lado, es necesario calcular otros parámetros dados por las ubicaciones de los nodos: distancias y diferencias de alturas. Esto se debe hacer para todas las combinaciones posibles, por lo que la forma más conveniente es el uso de la herramienta computacional MATLAB ®. Se implementaron dos funciones para calcular la distancia y la diferencia de altura dadas por las ecuaciones 5.34 y 5.33, respectivamente, en donde la distancia se calcula

según la fórmula de Harvesine [86].

$$\Delta H_{(i,j)} = H_j - H_i \quad (5.33)$$

$$\text{dist}_{(i,j)} = 2 \cdot r \cdot \arcsen \left(\sqrt{\text{sen}^2 \left(\frac{\varphi_j - \varphi_i}{2} \right) + \cos(\varphi_j) \cdot \cos(\varphi_i) \cdot \text{sen}^2 \left(\frac{\lambda_j - \lambda_i}{2} \right)} \right) \quad (5.34)$$

En la ecuación 5.34, φ representa la latitud y α la longitud, ambas en radianes, r representa el radio de la tierra. Con respecto a la ecuación 5.33, el código guarda el valor del parámetro sólo si es positivo, de lo contrario, la diferencia de altura es 0. Si fuese negativa, implicaría un costo negativo, es decir, que el sistema gana dinero transportando agua, lo cual no es lógico.

Todos los parámetros a utilizar se encuentran en Anexo M.

5.3.4. Funciones objetivo

El modelo presenta dos funciones objetivo, representando un indicador económico y un indicador ambiental.

Con el primer indicador económico se busca minimizar el costo total del modelo (TC), incluyendo costos operacionales y costos de capital. Esto se observa en la ecuación

$$FO1 = TC = (CapC + OpC) \quad (5.35)$$

Por otro lado, con el indicador ambiental se busca minimizar el impacto generado por la extracción de agua, tanto desde la fuente natural, como desde el mar. El daño por sobre extracción desde fuente conlleva algunos efectos que están considerados en el indicador WC , pero que solo aplica para fuentes superficiales, por lo que las fuentes subterráneas quedan sin abarcar. Así, el minimizar su extracción generaría una reserva constante y podría significar una regeneración paulatina de las napas que ya se encuentran sin agua disponible. Por otro lado, no se estaba abordando directamente el problema que traen las plantas desalinizadoras, generado principalmente por el poco o nulo tratamiento que le dan al agua de rechazo, o salmuera. Esto causa aumento en la salinidad del mar, efecto que se puede percibir desde metros hasta cientos de kilómetros alrededor del punto de descarga, dependiendo de las condiciones en que se realice [87]. También provocan un aumento en la temperatura, pero en este sentido, el impacto de las plantas de osmosis inversa es menor al de otras plantas de desalinización [87]. Otro efecto negativo es la posible presencia de contaminantes químicos dentro del agua de rechazo que va hacia el agua de mar. Todos estos efectos dañan al ecosistema acuático completo, generando problemas en los organismos marinos, lo que, a su vez, genera una disminución en la pesca artesanal de la zona. Muchos pescadores y artesanos de zonas marinas con presencia de desalinizadoras han visto afectadas sus producciones, por

lo que han existido diversas manifestaciones para pedir una regularización más estricta con respecto a la descarga al mar.

Por lo anteriormente descrito, el minimizar la extracción desde ambas fuentes es necesario para tener abarcado el impacto ambiental de una red de agua. Es importante mencionar que un sistema regional de agua posee otros efectos, pero para efectos de la presente memoria se considerará solo el impacto ambiental mencionado, y que puede reflejarse en la ecuación 5.36.

$$FO2 = \sum_{i \in \{FN \cup MR\}} \sum_{j \in DN_i} F_{i,j} \quad (5.36)$$

5.3.5. Metodología programación por metas

Como ya se mencionó al inicio de la sección 5.3, el método de programación por metas sirve para tratar problemas multi-objetivo. Las restricciones que se utilizan según esta metodología se muestran en las ecuaciones 5.37 y 5.38, donde las funciones objetivo $FO1$ y $FO2$ representan el impacto económico y ambiental, respectivamente, $w1$ y $w2$, corresponden a las importancias relativas de cada función, donde $w1 + w2 = 1$. Finalmente γ representa la máxima desviación entre el valor esperado y el valor de la función objetivo, por lo que es la variable a minimizar, dada por la ecuación 5.39. Los valores ideales se obtienen minimizando la función objetivo respectiva, mientras que los valores anti-ideales, se obtienen maximizando la función objetivo respectiva. Lo anterior se realiza para normalizar las funciones objetivo $FO1$ y $FO2$, y que al momento de minimizar, los valores sean comparables entre si (ambos entre 0 y 1, y adimensionales).

$$\left(\frac{FO1 - FO1_{id}}{FO1_{anti-id} - FO1_{id}} \right) \cdot w1 \leq \gamma \quad (5.37)$$

$$\left(\frac{FO2 - FO2_{id}}{FO2_{anti-id} - FO2_{id}} \right) \cdot w2 \leq \gamma \quad (5.38)$$

$$\min \gamma \quad (5.39)$$

5.3.6. Escenarios

Para poder estimar el nivel de aceptación de una planta de reciclaje se deberían hacer estudios de percepción en Chile. Como esta información no se encuentra actualmente, se establecen distintos escenarios basados en el nivel de la barrera humana, cambiando los parámetros $BH1_c$ y $BH2_d$ de las ecuaciones 5.24 y 5.25, respectivamente.

Se impone que $BH1_c$ y $BH2_d$ serán los mismos y fijarán dos escenarios, que aplican a cada consumo:

- Escenario 1: Barrera humana del 30 %, es decir, la gente no acepta más que un 30 % del agua reciclada para su consumo.
- Escenario 2: Barrera humana del 70 %, es decir, la gente no acepta más que un 70 % del agua reciclada para su consumo.

Esta oposición social es importante tomarla en consideración. Una encuesta aplicada a 2.000 adultos norteamericanos, mostró que un 13 % se negaba completamente a consumir este tipo de agua, 49 % estaban dispuestos a probarla y 38 % estaban indecisos [88].

En Toowoomba, Australia, se realizó un referéndum para decidir si se instalaban o no plantas de reciclaje para reuso indirecto. A pesar de la escasez hídrica de la zona, los habitantes votaron en contra del proyecto [89]. El contexto afecta considerablemente, el plebiscito se politizó y los principales argumentos en contra fueron [89]:

- La imagen de Toowoomba como 'ciudad verde' podría verse afectada a una 'ciudad sucia'.
- Producto de lo anterior, el comercio y turismo se verían afectados. Las industrias de comida disminuirían su producción para exportaciones y los turistas no querrían ir a una 'ciudad sucia'.
- No creían que el reciclaje de agua dejara el agua completamente potable, dudando de la credibilidad de la ciencia.

Así, también existen otros países que han tenido éxito en la implementación de tecnologías para reciclar agua. Es el caso de Singapur, donde tuvieron una estrategia de marketing acertada e, incluso, ahora el agua reciclada denominada como *NEWater* se vende embotellada y turistas la consumen [88].

Esto muestra la importancia de poder saber la percepción inicial de los habitantes que consumirán agua reciclada, para poder establecer las estrategias pertinentes y que la implementación sea un éxito.

5.4. Discusiones

En el capítulo se pudo formular el problema de optimización mediante la creación de la superestructura, división de los casos de estudio creación de conjuntos, variables, parámetros y restricciones, balance de masa de la situación base para la determinación de parámetros y estudio de ubicaciones de distintos puntos.

El dividir los casos de estudio en provincias y no en cuencas hace que el problema no pueda instalar más de tres tipos de plantas de tratamiento nuevas de cada tipo por región, ya que son tres provincias. Es una buena aproximación, aunque podría ser más conveniente la instalación de más plantas de tratamiento para disminuir los costos de operacionales de la red.

El tener distintos conjuntos facilita la escritura y comprensión del modelo. Los nodos ficticios, cuyos conjuntos si existen, sirven para poder representar ciertas conexiones dentro

de la red.

El supuesto de no estudiar contaminantes sería bueno incluirlo en un modelo más complejo si se quiere ver la ruta de los distintos contaminantes. Sin embargo, lo anterior no es un objetivo de la presente investigación, por lo que asumir que los flujos traen consigo la máxima razón de contaminantes que la ley lo permite, es un buen acercamiento ya que se reduce el costo de tratamiento.

El supuesto de estado estacionario no se cumple para todos los nodos, pero es una buena aproximación para plantear el balance de masa general y las restricciones. En general, las fuentes de agua no poseen el mismo tiempo de residencia, por lo que se podría hacer un modelo más complejo que incluya el tiempo como variable. Así, el supuesto de estado estacionario no sería necesario.

Para lo anterior, es necesario conocer las cuencas subterráneas, actualmente uno de los mayores problemas son los pocos estudios que se tienen de este tipo de fuente. No se saben bien sus dimensiones, calidad, dinámica, conexiones, etc. Es por esto que el máximo valor de extracción de aguas subterráneas de la ecuación 5.27 es aproximado mediante el flujo de extracción actual, sin embargo, este valor puede variar tanto positiva como negativamente. Un problema de la sobre explotación de aguas subterráneas es que puede generar movimientos de suelo indeseados, problemas en la comunidad e intrusión de agua de mar a las napas subterráneas, generando problemas de salinidad de las cuencas. Así, controlar la calidad de forma constante es necesario. Una opción de buffer natural para el reciclaje de agua es la inyección en napas subterráneas, por lo que el requerimiento de la barrera humana no sería necesario. Sin embargo, para hacer esto se hace imperante conocer el tamaño, calidad, interacciones físico-químicas, agentes biológicos y relaciones hidrogeológicas de todas las fuentes subterráneas de Chile, incluso, es necesario conocer fuentes de países cercano ya que los límites territoriales político-administrativos no necesariamente calzarán con los límites de las cuencas.

Por otro lado, la formulación trae consigo juicios éticos al momento de plantear restricciones, los cuales tienen relación con:

- La holgura de la demanda CS . Si bien, la determinación de este parámetro de holgura fue una decisión para acotar el problema, también tiene una incidencia directa al permitir que la demanda aumente
- El valor máximo permitido del indicador ambiental WC , donde se fija un valor pequeño para mejorar la auto regulación del río.
- El máximo flujo de extracción de aguas subterráneas, disminuyendo el riesgo de problemas de sobre explotación y sequía de estas fuentes.

Estos valores y restricciones pueden ser discutidos y dependen de valores éticos, opiniones de expertos, situación actual de Chile, prioridades a nivel nacional, entre otros.

Con lo anterior, también es necesario siempre considerar la opinión de las comunidades. En el presente trabajo esto se realiza, en parte, al considerar la barrera humana. Sin embargo,

también se escogieron localizaciones estratégicas de las plantas para no dañar a los pueblos más cercanos. Aunque pueden existir otros conflictos socio-culturales que se deben incluir al modelo, los beneficios que trae un proyecto de abastecimiento de agua a zonas con escasez hídrica generalmente son mayores a los problemas que puede traer consigo. El dilema principal se genera con las desalinizadoras, por lo que es imperante la búsqueda de técnicas de tratamiento de salmuera o agua de rechazo, o técnicas de disposición en el mar menos dañinas para el medio ambiente.

Se desprende que los parámetros escogidos pueden cambiar, y pueden ser estudiados con mayor profundidad en un futuro, pero sirven como una aproximación actual del comportamiento de las redes. Con respecto a las funciones objetivo escogidas, cumple con incluir el aspecto medioambiental que muchas veces es olvidado, sin embargo, el modelo puede complejizarse a través de herramientas como análisis de ciclo de vida, otros indicadores ecológicos, inclusión de funciones sociales, etc.

Finalmente, el modelo planteado logra cubrir las necesidades consideradas y representa un sistema de red de aguas real, por lo que puede ser aplicado a otras regiones o casos de estudio cambiando los elementos de los conjuntos y parámetros asociados.

Capítulo 6

Implementación y resolución del problema

Finalmente, al tener la formulación del problema, en conjunto con los parámetros y la división de los casos de estudio, se puede implementar el modelo en una herramienta computacional adecuada. A continuación se presenta la metodología seguida para la resolución del problema y el análisis de los resultados obtenidos.

6.1. Metodología específica

Para resolver el problema de optimización se siguieron los siguientes pasos:

- Estudio de la herramienta computacional GAMS [®], en donde se resolverá el problema.
- Para cada escenario, se siguió la siguiente metodología:
 - Escritura del problema de optimización mono objetivo en GAMS [®].
 - Ejecución el programa para obtener los valores ideales y anti-ideales de la metodología Programación por Metas.
 - Escritura del problema de optimización multi objetivo en GAMS [®].
 - Creación de la curva de Pareto mediante la modificación de las importancias relativas de las funciones objetivo.
 - Se analizan los resultados con importancias relativas iguales.
 - Creación del grafo con la solución optimizada para analizar los resultados y compararlos con la situación actual.

El problema se define como un problema MILP y se programó en la herramienta computacional GAMS IDE [®] y se resolvió mediante el solver CPLEX, que es apto para problemas lineales mixtos [90]. Se utilizó un computador ASUS con un procesador Intel Core i7-7700 HQ de memoria 16 GB. El código de programación para cada caso de estudio se muestra en el Anexo O.

6.2. Caso de estudio: región Antofagasta

Tanto para Antofagasta como para Atacama, se realizó un balance de masa de la región incluyendo todos los participantes del sistema. Este balance se encuentra en el Anexo M. El sistema actual se muestra en la Figura 6.1.

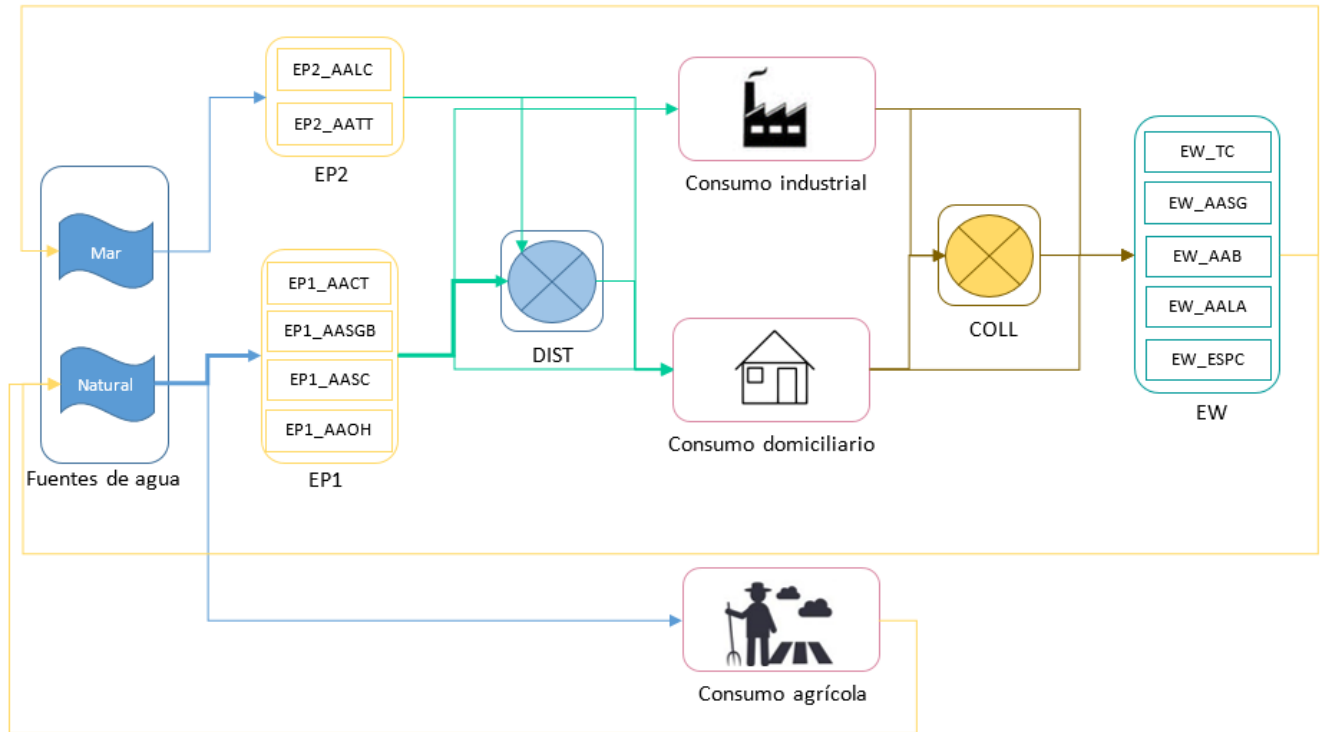


Figura 6.1: Grafo representativo de la situación actual de la región de Antofagasta. Los colores de los arcos representan las distintas calidades: celeste para calidad de fuente, turquesa para calidad potable, café para calidad de descarga en alcantarillado y amarillo para calidad de descarga en fuente de agua. Las líneas gruesas representan flujos que están sobre $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Dist corresponde a distribución y Coll a recolección. Los elementos de los conjuntos se explican en Anexo L. Elaboración propia

Los resultados para cada escenario se presentan a continuación.

6.2.1. Escenario 1

El escenario 1 implica una barrera humana del 30%. Los resultados de los valores ideales y anti-ideales se observan en la Tabla 6.1, en conjunto con las estadísticas principales del problema. Tiempo CPU se refiere al recurso temporal que se utilizó para resolver el problema ideal, en segundos, mientras que OptCr es el criterio de optimalidad, dado por la ecuación 6.1, donde BF es el valor de la función objetivo evaluada en la mejor solución actual, mientras que BP es el valor de la mejor solución posible [90]. Mientras más pequeño sea el valor, más precisa será la solución, sin embargo, esto sugiere un problema ya que existe un trade-off

entre el tiempo computacional y $OptCr$.

$$\frac{|BP - BF|}{|BP|} \leq OptCr \quad (6.1)$$

Tabla 6.1: Tabla con resultados de problemas mono objetivo para el escenario 1 de la región de Antofagasta.

-	Ambiental [m^3/s]	Económico [$MUSD/año$]
Ideal	5,46	884,45
No ideal	15,77	61.495,34
Tiempo CPU ideal [s]	0,078	0,125
Criterio de optimalidad relativa ($OptCr$)	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$

Luego, con los valores del problema mono objetivo, se implementó en la metodología de programación por metas y se variaron los pesos relativos, w_1 y w_2 , de cada función objetivo para obtener la curva de Pareto, la cual se observa en la Figura 6.2. Si se eliminan los puntos extremos de la curva, es decir, las combinaciones de importancias relativas de 1-0 o 0-1, se tiene la Figura 6.3. Con esto, se pueden visualizar de mejor forma los puntos intermedios.

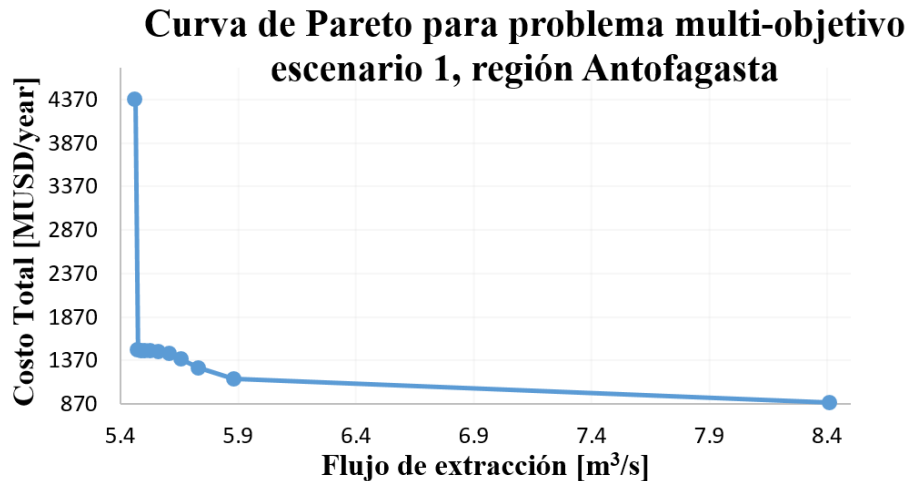


Figura 6.2: Curva de Pareto para problema multi-objetivo de la región de Antofagasta con escenario 1. Elaboración propia.

Curva de Pareto parcial para problema multi-objetivo escenario 1, región Antofagasta

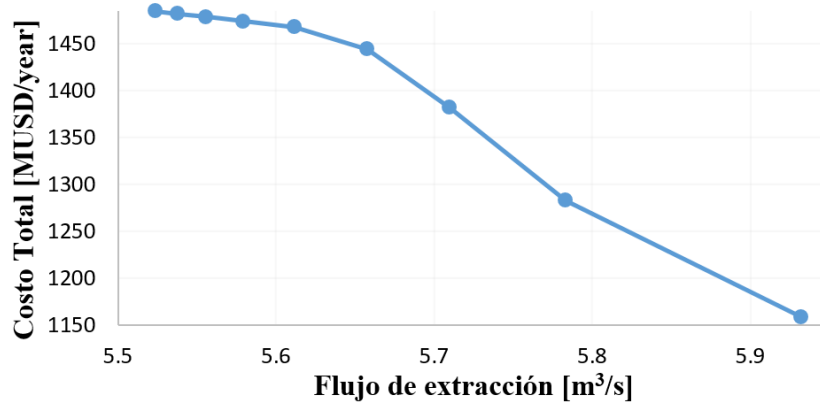


Figura 6.3: Curva de Pareto parcial para problema multi-objetivo de la región de Antofagasta con escenario 1. Elaboración propia.

Los puntos para la realización de la curva se encuentran en el Anexo Ñ.

Se observa una contraposición de las funciones objetivo. Los valores extremos de la curva de Pareto se eliminaron para analizar con mayor detención los puntos intermedios. Utilizar los máximos como valores anti-ideales usualmente trae el problema de que las combinaciones 1-0 y 0-1 son muy alejadas de los demás valores.

Para ver la configuración de la red óptima se decide analizar la solución que se compone de un 50 % de importancia de la función de costos y de 50 % de importancia de la función ambiental. El grafo representativo de esta solución se observa en la Figura 6.4. Se puede ver la eliminación de las plantas de tratamiento de agua potable actual y el reemplazo por plantas nuevas. También se observa el uso de nuevas plantas de tratamiento de agua servida para calidad potable y la conservación de sólo una planta de tratamiento de agua servida existente. Se abastece al 100 % de la población con agua potable, incluyendo al consumo agrícola que no necesita tal calidad. También se observa el uso de redes de distribución y recolección.

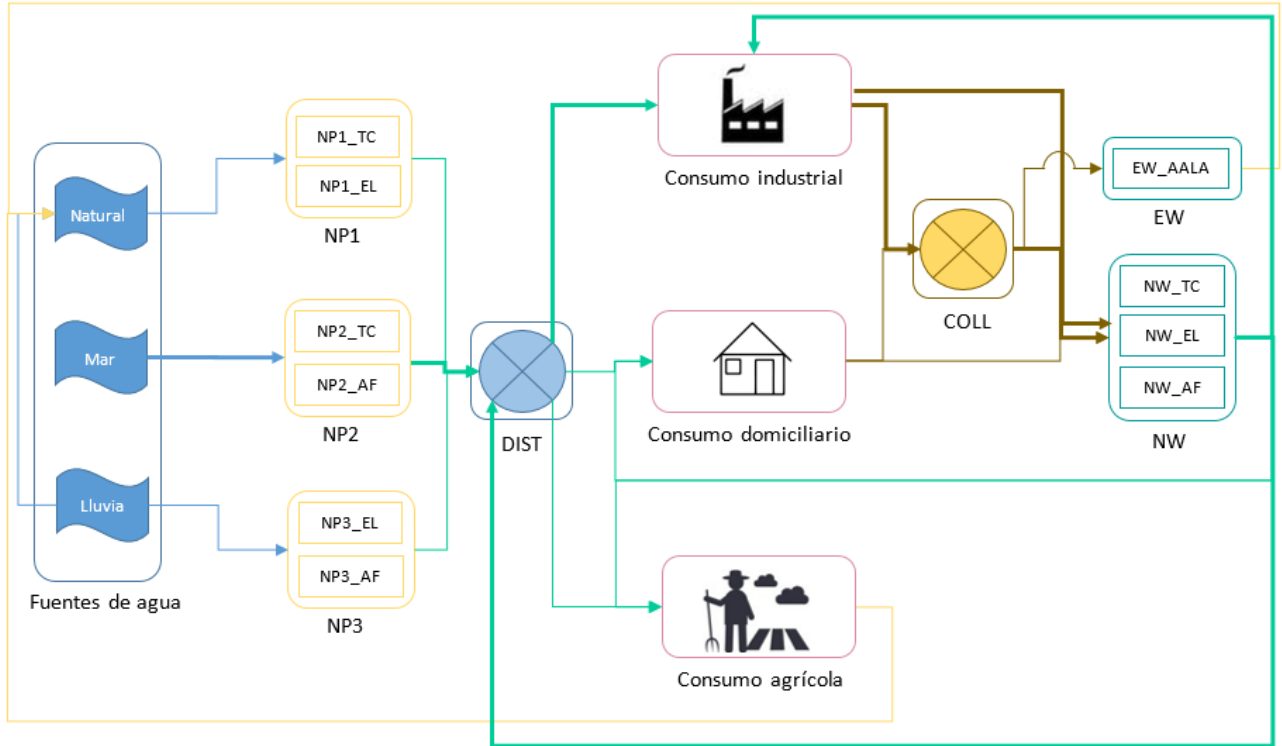


Figura 6.4: Grafo para situación optimizada de la región de Antofagasta para escenario 1, cuando las importancias relativas de las funciones de costo y ambientales son iguales. Los colores de los arcos representan las distintas calidades: celeste para calidad de fuente, turquesa para calidad potable, café para calidad de descarga en alcantarillado y amarillo para calidad de descarga en fuente de agua. Las líneas gruesas representan flujos que están sobre $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Dist corresponde a distribución y Coll a recolección. Los elementos de los conjuntos se explican en Anexo L. Elaboración propia

6.2.2. Escenario 2

El escenario 2 implica una barrera humana del 70%. Los resultados de los valores ideales y anti-ideales se observan en la Tabla 6.2, en conjunto con las estadísticas principales del problema.

Tabla 6.2: Tabla con resultados de problemas mono objetivo para el escenario 2 de la región de Antofagasta.

-	Ambiental [m^3/s]	Económico [MUSD/año]
Ideal	3,14	678,44
No ideal	16,69	66.268,04
Tiempo CPU ideal [s]	0,25	0,312
Criterio de optimalidad relativa ($OptCr$)	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$

Luego, con los valores del problema mono objetivo, se implementó en la metodología de programación por metas y se variaron los pesos relativos, w_1 y w_2 , de cada función objetivo para obtener la curva de Pareto, la cual se observa en la Figura 6.5. Si se eliminan los puntos extremos de la curva, es decir, las combinaciones de importancias relativas de 1-0 o 0-1, se tiene la Figura 6.6. Con esto, se pueden visualizar de mejor forma los puntos intermedios.

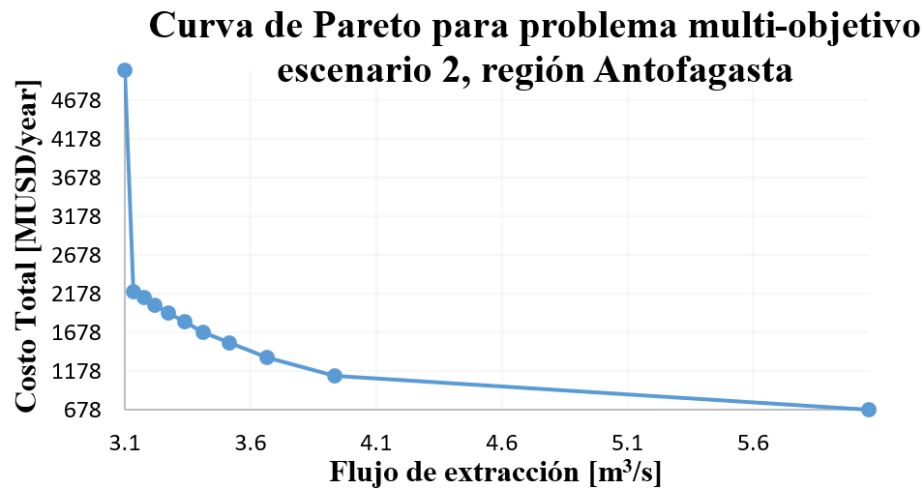


Figura 6.5: Curva de Pareto para problema multi-objetivo de la región de Antofagasta con escenario 2. Elaboración propia.

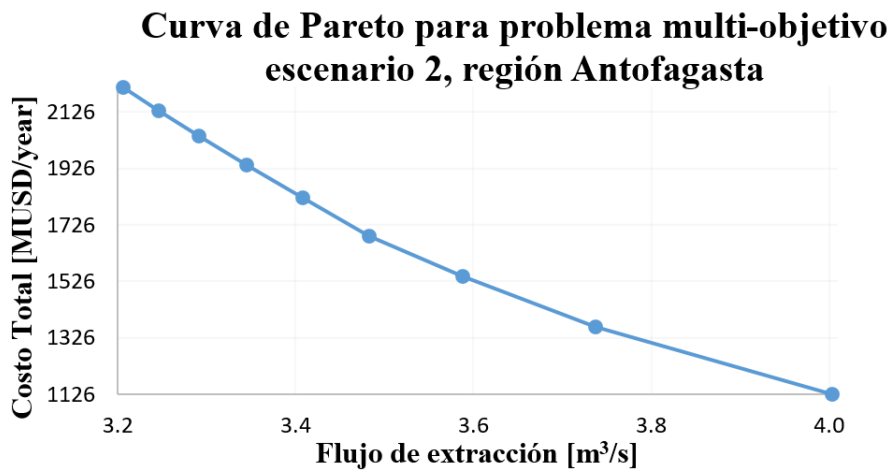


Figura 6.6: Curva de Pareto parcial para problema multi-objetivo de la región de Antofagasta con escenario 2. Elaboración propia.

Los puntos para la realización de la curva se encuentran en el Anexo Ñ.

Se observa una contraposición de las funciones objetivo. Los valores extremos de la curva de Pareto se eliminaron para analizar con mayor detención los puntos intermedios. Utilizar los máximos como valores anti-ideales usualmente trae el problema de que las combinaciones 1-0 y 0-1 son muy alejadas de los demás valores intermedios.

Para ver la configuración de la red óptima se decide analizar la solución que se compone de un 50% de importancia de la función de costos y de 50% de importancia de la función ambiental. El grafo representativo de esta solución se observa en la Figura 6.7. Se observa la instalación de nuevas plantas desalinizadoras y de tratamiento de aguas lluvias pero la mantención de algunas plantas potabilizadoras convencionales actuales. También se observa que no existen nodos de recolección, por lo que la salida de los consumos se conectan directamente con las plantas de tratamiento de aguas servidas. Con respecto a estas últimas, existen plantas nuevas y se modifican las que existen actualmente.

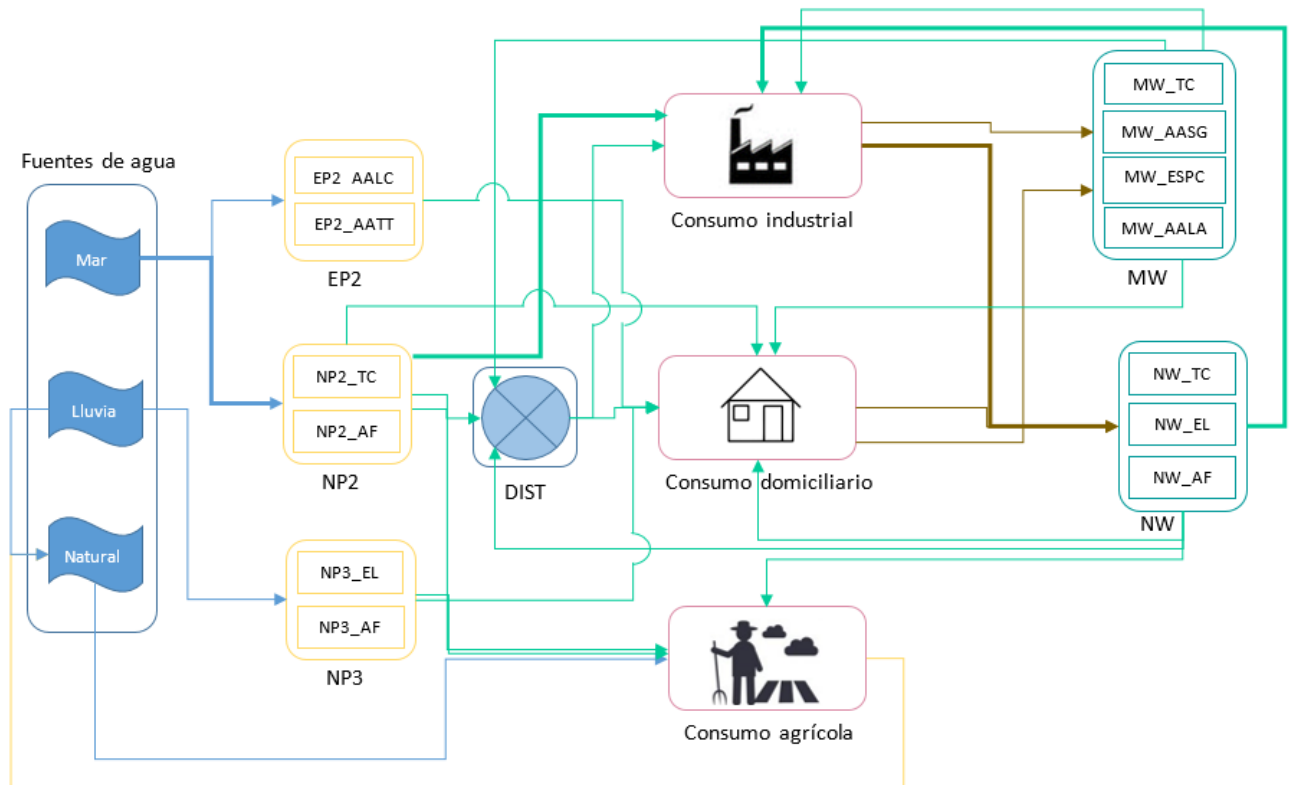


Figura 6.7: Grafo para situación optimizada de la región de Antofagasta para escenario 2, cuando las importancias relativas de las funciones de costo y ambientales son iguales. Los colores de los arcos representan las distintas calidades: celeste para calidad de fuente, turquesa para calidad potable, café para calidad de descarga en alcantarillado y amarillo para calidad de descarga en fuente de agua. Las líneas gruesas representan flujos que están sobre 1 m³/s. Dist corresponde a distribución y Coll a recolección. Los elementos de los conjuntos se explican en Anexo L. Elaboración propia

6.2.3. Comparación de escenarios

En la Tabla 6.3 se muestra una Tabla comparativa entre resultados dados por la situación optimizada de los escenarios 1 y 2 cuando las importancias relativas son iguales, en comparación con el caso actual. Para calcular el porcentaje de agua reciclada, se utiliza un promedio de los porcentajes que llegan a cada consumo, ya que pueden ser distintos unos de otros, dependiendo de las necesidades. Se puede observar que la cobertura es del 100% en

ambos escenarios, que el flujo de extracción en el escenario 1 es mayor al flujo extraído en el escenario 2, y que el costo del escenario 2 es mayor al escenario 1.

Tabla 6.3: Tabla comparativa entre principales resultados de escenario 1, 2 y situación actual para región de Antofagasta. EP se refiere a plantas de potabilización (PTAP) existentes, NP a PTAP nuevas, EW a plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) existentes, NW a PTAS nuevas y MW a PTAS modificadas. Para PTAP, las plantas tipo 1 corresponden a plantas convencionales, las tipo 2 a desalinizadoras, y las tipo 3 a tratamiento de agua lluvia.

-	Escenario actual	Escenario 1	Escenario 2
Flujo de extracción [m^3/s]	1,75	5,56	3,38
Costo total [MUSD/año]	967,27	1467,61	1823,30
Número de EP1	4	0	0
Número de EP2	2	0	2
Número de NP1	0	2	0
Número de NP2	0	2	2
Número de NP3	0	2	2
Número de EW	5	1	0
Número de MW	0	0	4
Número de NW	0	3	3
Cobertura de demanda %	28	100	100
Porcentaje de agua reciclada	0	30	67

6.2.4. Discusiones

En las Figuras 6.2 y 6.5 se muestran las curvas de Pareto completas para los escenarios 1 y 2, respectivamente, como los puntos intermedios están lejos de los puntos más extremos, se analizan con mayor detención las Figuras 6.3 y 6.6. Los valores ideales y anti-ideales cambian al cambiar de escenario. En el escenario 2 se tienen valores ideales más pequeños y valores anti-ideales más grandes que en el escenario 1. Esto es lógico, ya que en el escenario 2 se tiene una mayor holgura con respecto a la instalación y flujos a tratar por parte de las plantas de reciclaje, lo que puede traer consigo que las variables de decisión puedan tener más opciones. Se observan curvas de forma diferente para ambos escenarios, lo que tiene relación principalmente con la decisión de instalar o modificar plantas y de las conexiones que existan. No se puede establecer una relación entre escenario y forma que tendrá la curva de Pareto, ya que los puntos en ella están sujetos a parámetros del problema (además de restricciones y función objetivo). Como en cada escenario se cambió el parámetro de la barrera humana, el espacio factible para la solución cambiará y, con ello, la forma del frente de Pareto. Para establecer una relación, se deben analizar a fondo las restricciones relacionadas de este parámetro y su relación con las funciones objetivo. Como el presente trabajo solo busca crear un primer modelo para el diseño de una red de agua, este aspecto se dejó como trabajo a futuro.

De los gráficos y de los datos que se encuentran en Anexo Ñ, se deduce que los costos en general son más altos en el escenario 2, pero el impacto ambiental es menor. Esto se puede observar en los gráficos de las Figuras 6.8 y 6.9. El rango de costos de en los que se

desenvuelve el escenario 2 es mayor, siendo su valor máximo un 8 % mayor que el valor máximo para el escenario 1. Por otro lado, cuando se llegan a costos menores a 1500 [MUSD/año], se tiene que para el mismo costo, el flujo de extracción para el escenario 2 es menor que para el escenario 1. Se ve entonces una relación con el nivel de barrera humana. Si bien este parámetro podría ser una variable que se puede incluso optimizar para saber el valor apto entre costos, ambiente y sociedad, es difícil el control de esta variable, ya que tiene relación con la percepción humana, un mayor nivel de aceptación requerirá un mayor costo en estrategias de marketing y de educación de la población, en conjunto con la necesidad de estudios probabilísticos de efectividad de estas estrategias.

Curva de Pareto para problema multi-objetivo, región Antofagasta

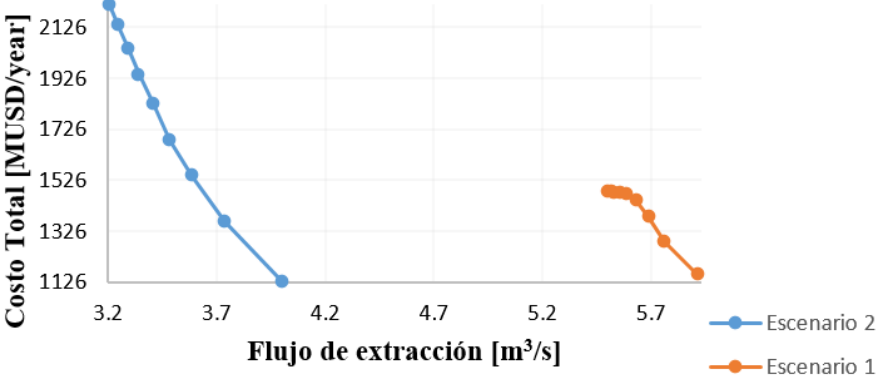


Figura 6.8: Curvas de Pareto parciales de escenarios 1 y 2 contrapuestos para la región de Antofagasta. Elaboración propia.

Curva de Pareto para problema multi-objetivo, región Antofagasta

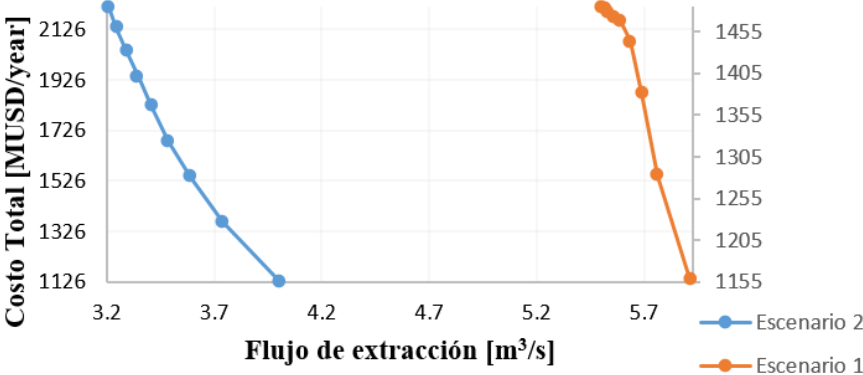


Figura 6.9: Curvas de Pareto parciales de escenarios 1 y 2 contrapuestos para la región de Antofagasta. Elaboración propia.

Es difícil establecer la causa de los resultados, debido a que son multifactoriales, con restricciones complejas e interdependencias a través de los flujos. Sin embargo, con respecto

a los grafos dados para la solución de importancias iguales en el problema multi-objetivo, y el análisis comparativo de la Tabla 6.3, se puede desprender lo siguiente:

- En el escenario 1 se observa que se mantienen las redes de recolección y distribución, mientras que en el escenario 2 la red de recolección no existe. Esto se puede deber a que en el escenario 2 existen más plantas de reciclaje modificadas, por lo que puede ser más económica la conexión directa con los consumos que la unión a redes de recolección. Además uno de los supuestos importantes es que la pérdida de agua sería por nodo utilizado, por lo que al no usar el nodo de recolección, no existe esa pérdida de agua. Sin embargo, al usar recolección, puede existir una disminución en los costos asociados a transporte de agua. En la Figura 6.10 se observa un diagrama simplificado de un nodo que envía agua a tres plantas de tratamiento. Si las plantas están relativamente cerca de un punto de recolección, es conveniente económicamente el uso de la red de recolección general. Si el óptimo de un problema decide ocupar o no las redes, tendrá relación con los costos y el trade-off que se hace con las pérdidas de agua relacionadas al uso de la red, es decir, el costo se puede reducir por la cercanía con el uso de la red. El análisis es análogo con la red de distribución.

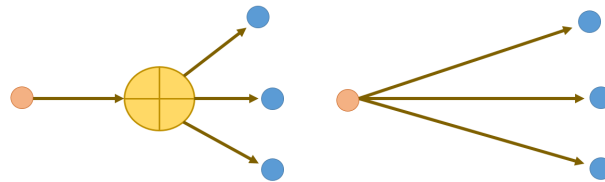


Figura 6.10: Ejemplificación para disminución en distancia recorrida utilizando recolección en comparación con no utilizar. A la izquierda se muestra el uso de la red de recolección y a la derecha, la conexión directa entre los nodos. Elaboración propia.

- En el escenario 1 se mantiene una planta de tratamiento de aguas servidas existente y en el escenario 2 se modifican 4. Esto se debe a la holgura del escenario 2. Al poder reciclar más agua, se modifican las plantas actuales para que exista ese ciclo. Así, es más conveniente reciclar que extraer. Para disminuir costos, se mantienen las dos plantas desalinizadoras actuales y se agregan otras dos. El agua fuentes naturales es usada para consumo agrícola ya que es más barata, sin embargo, en el caso del escenario 1 se utiliza agua potable para este consumo, donde el agua natural va a plantas de tratamiento. Esto último se debe a que, como existe un flujo que va hacia fuentes naturales correspondiente a la PTAS existente, se debe extraer más agua de esta fuente que en el escenario 1 para cumplir con las restricciones dadas por la ecuaciones 5.31 y 5.32. Probablemente con un mayor flujo es conveniente potabilizar el agua para que se una a la red general de distribución, para disminuir los costos asociados a transporte, sin embargo, esto no se puede asegurar por lo que sólo es una hipótesis de la causa del resultado óptimo.
- En ambos escenarios se utilizan plantas de tratamiento de aguas lluvias. Esto por el bajo costo de instalación y de operación de las plantas. Con respecto a esto, se hace necesario un análisis posterior de las mejores formas de instalar este tipo de plantas, ya que existen plantas modulares de menor costo que tratan el agua recolectada por redes

independientes de las redes de recolección de aguas servidas, pero es necesario también un mayor costo en la mantención de estas redes.

- En ambos escenarios se observa que las plantas desalinizadoras se encuentran en Tocopilla y Antofagasta, que son las provincias con acceso a la costa. En el caso del escenario 1, donde existe extracción para potabilización de las fuentes naturales, estas plantas se instalan en las provincias de Tocopilla y El Loa, donde se encuentran los principales ríos.
- En ambos escenarios se instalan nuevas plantas de tratamiento de aguas servidas. En el primer caso, se prefiere la instalación por sobre la modificación de las actuales. Esto puede deberse a las restricciones de capacidad de las plantas existentes, a las cuales no se les permitió una ampliación de la capacidad (más allá que la capacidad máxima de verano, según la ecuación 5.18). También se puede deber a la ubicación de las plantas nuevas, puede ser más conveniente ya que disminuye el costo operacional de las redes de agua.
- El porcentaje de agua reciclada se acerca bastante al límite impuesto para cada caso. La diferencia puede nacer en que para algunos consumos es mas conveniente tener menos agua reciclada por los costos que ésta genera, ya sea de transporte o de tratamiento de la misma.
- Se observa un aumento de casi el 50% del costo en el caso del escenario 1 y casi un 100% en el caso del escenario 2, al compararlos con el costo total. Sin embargo, el flujo de agua que se extrae del escenario 1 es aproximadamente 3 veces mayor, mientras que en el escenario 2 es aproximadamente 2 veces mayor. El aumento del costo en ambos escenarios se debe a que se instalan plantas nuevas, lo que genera mayor gasto de capital y operacional. Además, se cubre el 100% de la demanda con agua potable, lo que también aumenta el costo.
- No existe una correlación directa entre el escenario, el flujo de extracción y el costo total, es decir, si se aumenta la barrera humana, el costo aumenta, pero el flujo de extracción disminuye. Es por esto que también se puede hacer un análisis para determinar el flujo de reciclaje óptimo, para enfocar una estrategia adecuada que tenga como meta ese flujo determinado.

6.3. Caso de estudio: región Atacama

Tanto para Antofagasta como para Atacama, se realizó un balance de masa de la región incluyendo todos los participantes del sistema. Este balance se encuentra en el Anexo M. El sistema actual se muestra en la Figura 6.11.

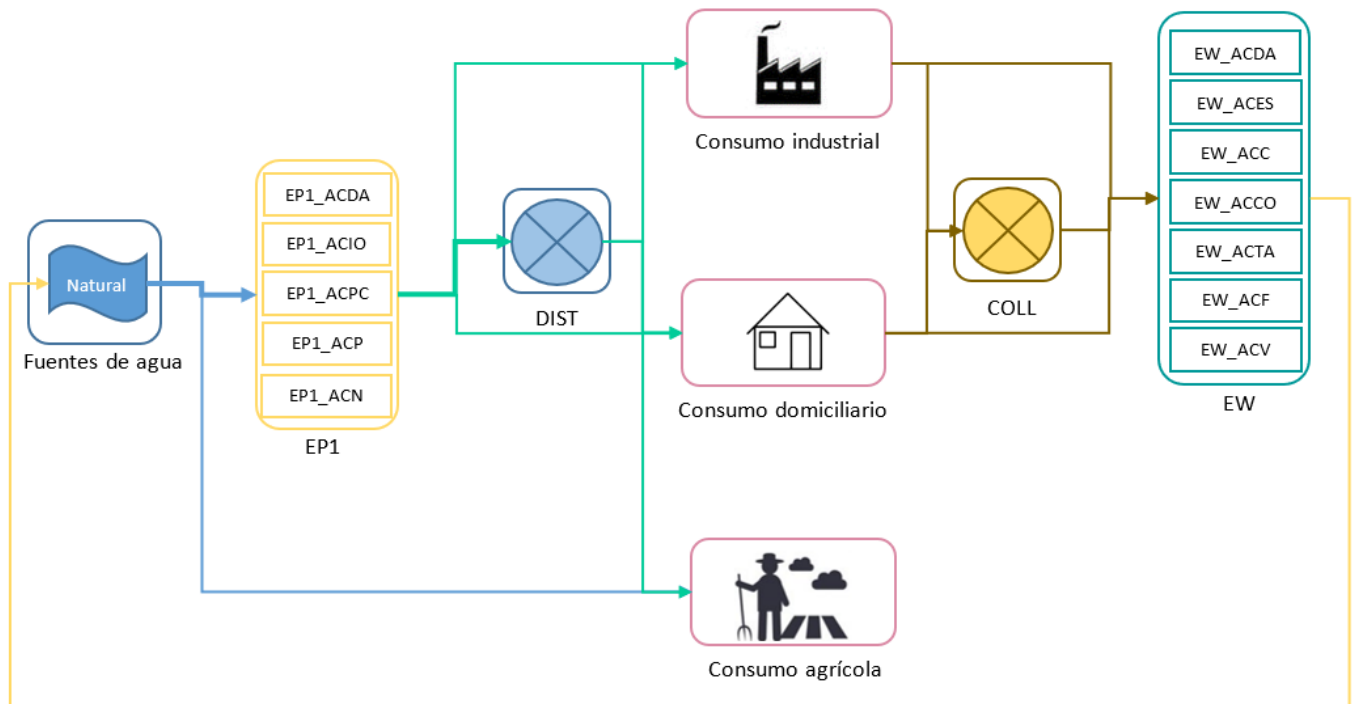


Figura 6.11: Grafo representativo de la situación actual de la región de Atacama. Los colores de los arcos representan las distintas calidades: celeste para calidad de fuente, turquesa para calidad potable, café para calidad de descarga en alcantarillado y amarillo para calidad de descarga en fuente de agua. Las líneas gruesas representan flujos que están sobre $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Dist corresponde a distribución y Coll a recolección. Los elementos de los conjuntos se explican en Anexo L. Elaboración propia

Los resultados para cada escenario se presentan a continuación.

6.3.1. Escenario 1

El escenario 1 implica una barrera humana del 30%. Los resultados de los valores ideales y anti-ideales se observan en la Tabla 6.4, en conjunto con las estadísticas principales del problema.

Tabla 6.4: Tabla con resultados de problemas mono objetivo para el escenario 1 de la región de Atacama.

-	Ambiental [m^3/s]	Económico [$\text{MUSD}/\text{año}$]
Ideal	12,56	233,83
No ideal	17,60	13.240,63
Tiempo CPU [s]	0,156	0,282
Criterio de optimalidad relativa ($OptCr$)	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$

Luego, con los valores del problema mono objetivo, se implementó en la metodología de programación por metas y se variaron las combinaciones de las importancias relativas de cada

función para obtener la curva de Pareto, la cual se observa en la Figura 6.12. Si se eliminan los puntos extremos de la curva, es decir, las combinaciones de importancias relativas de 1-0 o 0-1, se tiene la Figura 6.13.

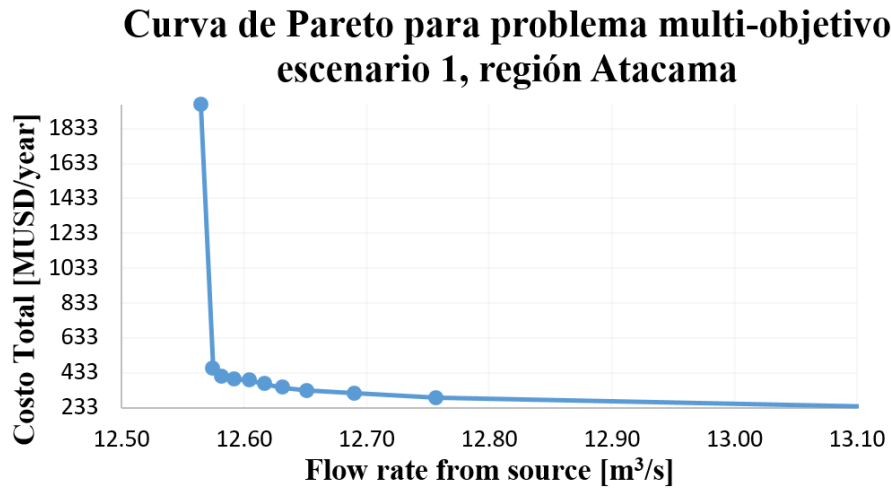


Figura 6.12: Curva de Pareto para problema multi-objetivo de la región de Atacama con escenario 1. Elaboración propia.

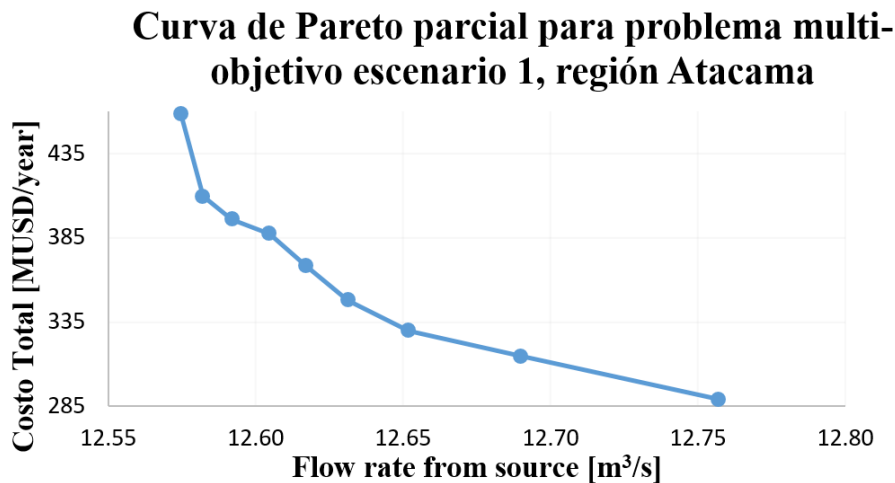


Figura 6.13: Curva de Pareto parcial para problema multi-objetivo de la región de Atacama con escenario 1. Elaboración propia.

Los puntos para la realización de la curva se encuentran en el Anexo Ñ.

Se observa una contraposición de las funciones objetivo. Los valores extremos de la curva de Pareto se eliminaron para analizar con mayor detención los puntos intermedios. Utilizar los máximos como valores anti-ideales usualmente trae el problema de que las combinaciones 1-0 y 0-1 son muy alejadas de los demás valores intermedios.

Para ver la configuración de la red óptima se decide analizar la solución que se compone

de un 50% de importancia de la función de costos y de 50% de importancia de la función ambiental. El grafo representativo de esta solución se observa en la Figura 6.14. Se puede ver que no existen las redes de recolección o distribución. Existen plantas de potabilización actuales y plantas nuevas, de desalinización y tratamiento de aguas lluvias. Además, existen plantas de tratamiento de aguas residuales nuevas y plantas modificadas. Todos los consumos son abastecidos en su totalidad.

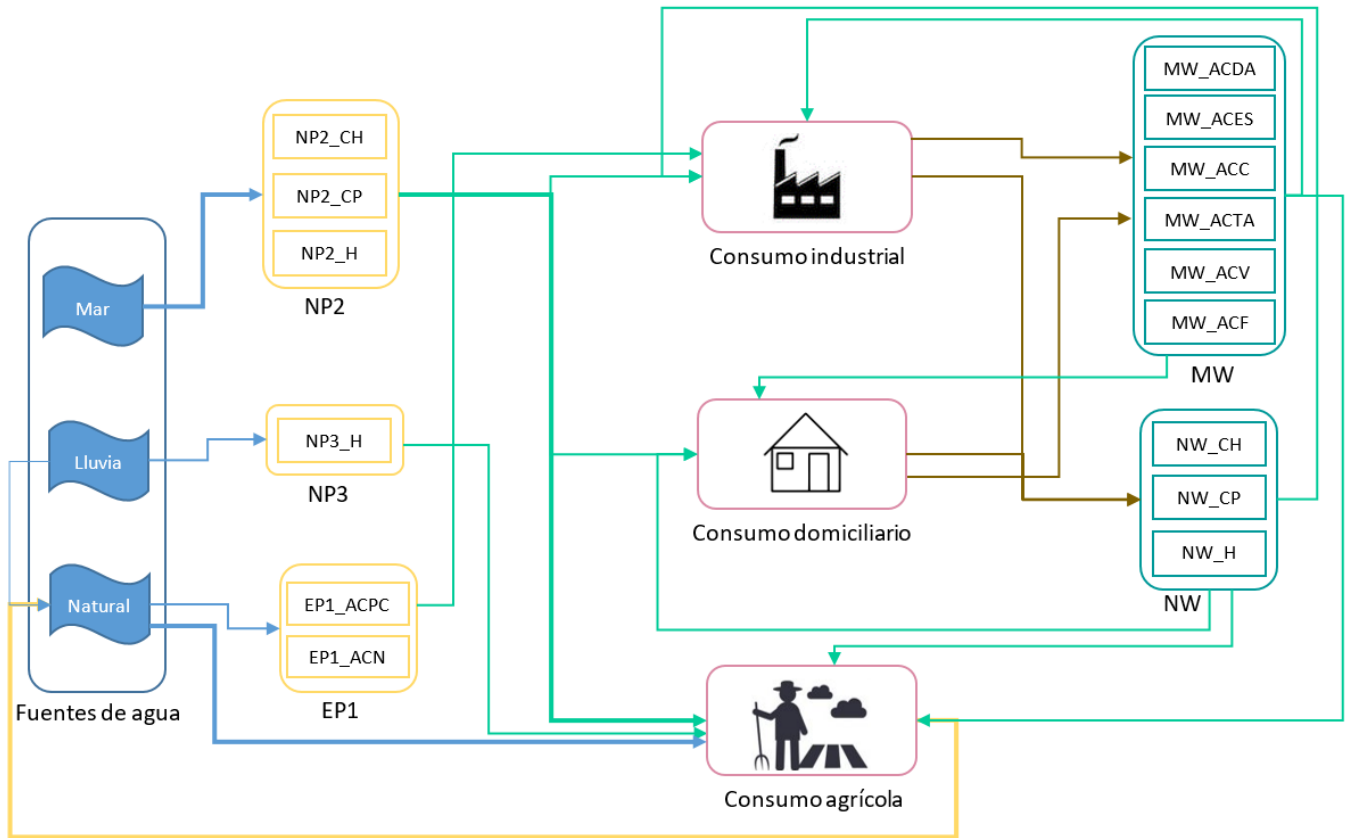


Figura 6.14: Grafo para situación optimizada de la región de Atacama para escenario 1, cuando las importancias relativas de las funciones de costo y ambientales son iguales. Los colores de los arcos representan las distintas calidades: celeste para calidad de fuente, turquesa para calidad potable, café para calidad de descarga en alcantarillado y amarillo para calidad de descarga en fuente de agua. Las líneas gruesas representan flujos que están sobre $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Dist corresponde a distribución y Coll a recolección. Los elementos de los conjuntos se explican en Anexo L. Elaboración propia

6.3.2. Escenario 2

El escenario 2 implica una barrera humana del 70%. Los resultados de los valores ideales y anti-ideales se observan en la Tabla 6.5, en conjunto con las estadísticas principales del problema.

Tabla 6.5: Tabla con resultados de problemas mono objetivo para el escenario 2 de la región de Atacama.

-	Ambiental [m^3/s]	Económico [$MUSD/año$]
Ideal	12,56	233,83
No ideal	17,60	13.240,63
Tiempo CPU [s]	0,234	0,226
Criterio de optimalidad relativa ($OptCr$)	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$

Luego, con los valores del problema mono objetivo, se implementó en la metodología de programación por metas y se variaron las combinaciones de las importancias relativas de cada función para obtener la curva de Pareto, la cual se observa en la Figura 6.15. Si se eliminan los puntos extremos de la curva, es decir, las combinaciones de importancias relativas de 1-0 o 0-1, se tiene la Figura 6.16.

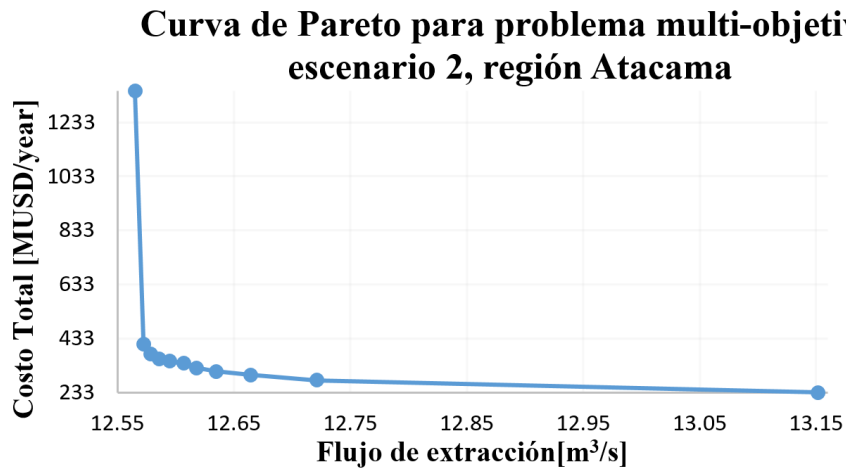


Figura 6.15: Curva de Pareto para problema multi-objetivo de la región de Atacama con escenario 2. Elaboración propia.

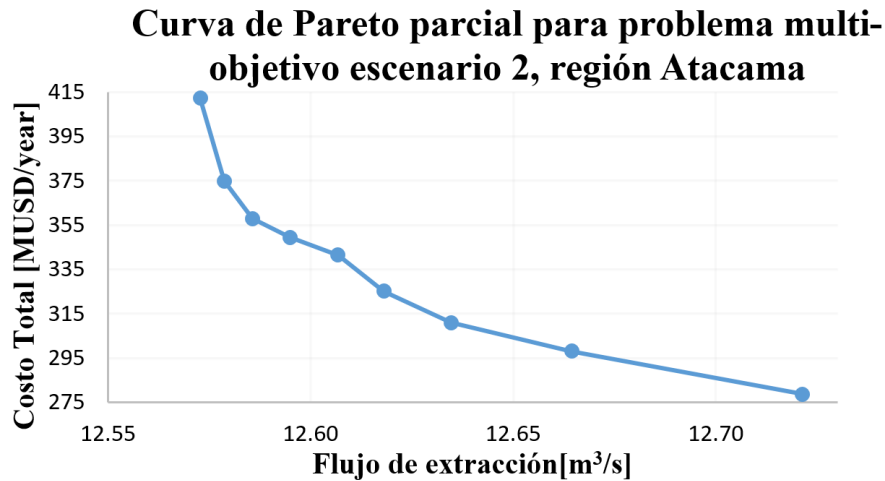


Figura 6.16: Curva de Pareto parcial para problema multi-objetivo de la región de Atacama con escenario 2. Elaboración propia.

Los puntos para la realización de la curva se encuentran en el Anexo Ñ.

Se observa una contraposición de las funciones objetivo. Los valores extremos de la curva de Pareto se eliminaron para analizar con mayor detención los puntos intermedios. Utilizar los máximos como valores anti-ideales usualmente trae el problema de que las combinaciones 1-0 y 0-1 son muy alejadas de los demás valores intermedios.

Para ver la configuración de la red óptima se decide analizar la solución que se compone de un 50% de importancia de la función de costos y de 50% de importancia de la función ambiental. El grafo representativo de esta solución se observa en la Figura 6.17. Se puede ver que no existen las redes de recolección pero sí la de distribución. Existe una planta de potabilización actual en conjunto con plantas nuevas, de desalinización y tratamiento de aguas lluvias. Además, existen plantas de tratamiento de aguas residuales nuevas y plantas modificadas. Todos los consumos son abastecidos en su totalidad.

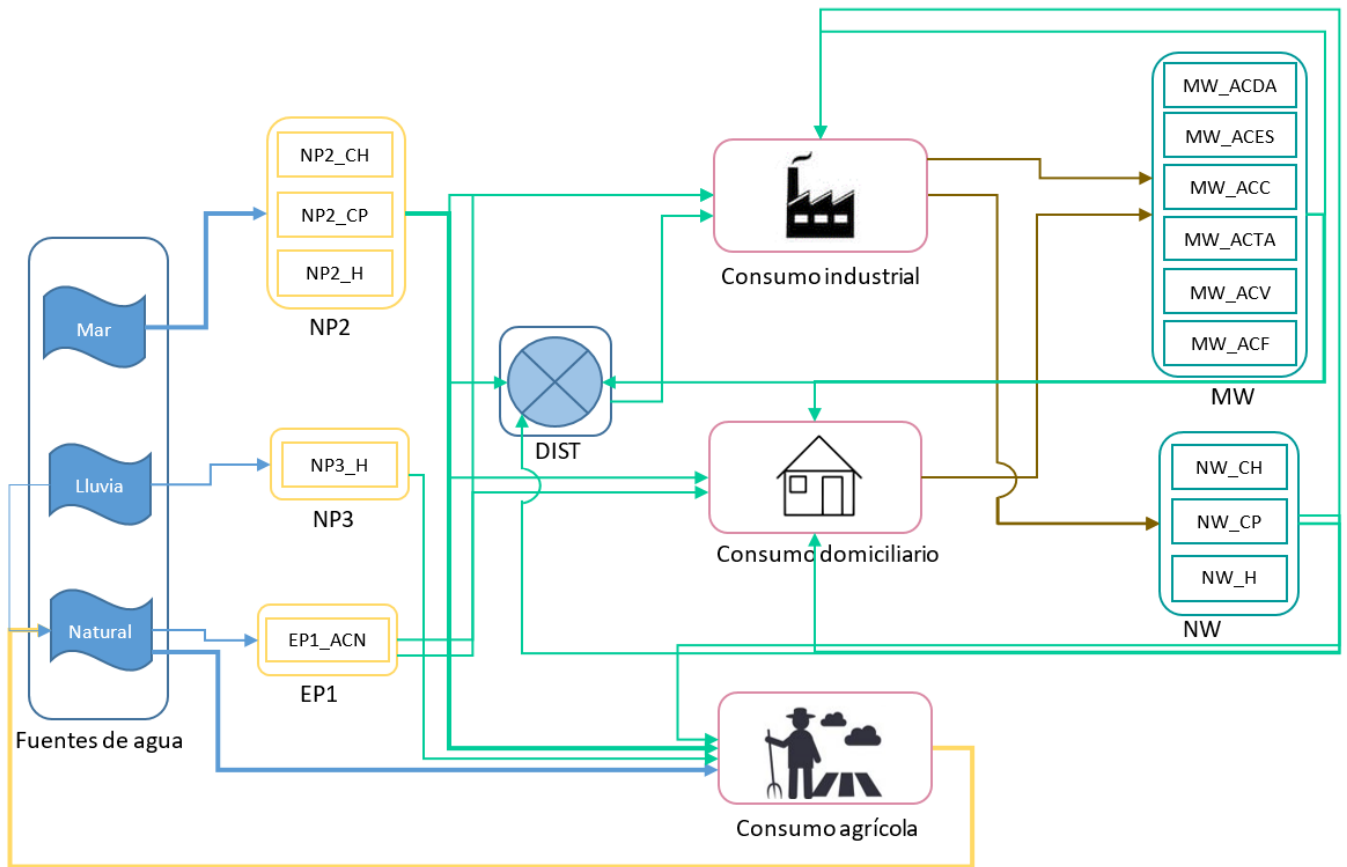


Figura 6.17: Grafo para situación optimizada de la región de Atacama para escenario 2, cuando las importancias relativas de las funciones de costo y ambientales son iguales. Los colores de los arcos representan las distintas calidades: celeste para calidad de fuente, turquesa para calidad potable, café para calidad de descarga en alcantarillado y amarillo para calidad de descarga en fuente de agua. Las líneas gruesas representan flujos que están sobre $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Dist corresponde a distribución y Coll a recolección. Los elementos de los conjuntos se explican en Anexo L. Elaboración propia

6.3.3. Comparación de escenarios

En la Tabla 6.6 se muestra una Tabla comparativa entre resultados dados por la situación optimizada de los escenarios 1 y 2 cuando las importancias relativas son iguales, en comparación con el caso actual. Para calcular el porcentaje de agua reciclada, se utiliza un promedio de los porcentajes que llegan a cada consumo, ya que pueden ser distintos unos de otros, dependiendo de las necesidades. Los resultados muestran que se cubren el 100 % de las demandas en ambos escenarios, que se instalan nuevas plantas de reciclaje y nuevas plantas de tratamiento de aguas lluvias en ambos casos, el flujo de extracción entre el escenario 1 y 2 es similar, pero mayor al escenario actual. El costo del escenario 1 es mayor al costo del escenario 2.

Tabla 6.6: Tabla comparativa entre principales resultados de escenario 1, 2 y situación actual para región de Atacama. EP se refiere a plantas de potabilización (PTAP) existentes, NP a PTAP nuevas, EW a plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) existentes, NW a PTAS nuevas y MW a PTAS modificadas. Para PTAP, las plantas tipo 1 corresponden a plantas convencionales, las tipo 2 a desalinizadoras, y las tipo 3 a tratamiento de agua lluvia.

-	Escenario actual	Escenario 1	Escenario 2
Flujo de extracción [m^3/s]	1,19	12,62	12,61
Costo total [MUSD/año]	138,90	368,29	341,55
Número de EP1	5	2	1
Número de EP2	0	0	0
Número de NP1	0	0	0
Número de NP2	0	3	3
Número de NP3	0	1	1
Número de EW	7	0	0
Número de MW	0	6	6
Número de NW	0	3	3
Cobertura de demanda %	9	100	100
Porcentaje de agua reciclada	0	18	18

6.3.4. Discusiones

En las Figuras 6.12 y 6.15 se muestran las curvas de Pareto completas para los escenarios 1 y 2, respectivamente, como los puntos intermedios están lejos de los puntos más extremos, se analizan con mayor detención las Figuras 6.13 y 6.16. Los valores ideales y anti-ideales no cambian al cambiar el nivel de barrera humana, como pasa en el caso de Antofagasta, donde al tener mayor holgura, el rango de variación de costos es mayor. Se intentó cambiar la barrera humana a un nivel más pequeño, para ver el comportamiento. Recién con una barrera humana de 0,15 aumentaba el valor de extracción de flujo. Esto se puede deber a que los principales consumos que se tienen son por parte del consumo agrícola, los cuales no se pueden reciclar, porque el agua de regadío se infiltra hacia acuíferos o se evapora, y en ambos casos no se puede recuperar. Así, el consumo total es de $13,4 [m^3/s]$, en donde el 85 % aproximadamente corresponde a consumo agrícola, por lo que se debe extraer un mínimo para satisfacer las necesidades de la región. Este mínimo es el mismo sin importar el porcentaje de barrera humana, ya que no se puede hacer más reciclaje del que ya existe. Para analizar ambos escenarios, es conveniente observar la Figura 6.18. Se puede extraer que el escenario 2 es más conveniente económicamente, para un mismo flujo de extracción, el escenario 1 supone un costo mayor que el escenario 2. Esto se puede deber a que, con menor barrera humana, se tiene mayor libertad para reconfigurar internamente los flujos y minimizar los costos, aunque los mínimos y máximos para normalizar las funciones del problema multi-objetivo, se mantengan. Así, al igual que en caso de Antofagasta, es necesario poder determinar la barrera humana actual y si es conveniente invertir tiempo y dinero para aumentar el porcentaje de aceptación de las tecnologías de reciclaje. Sin embargo, este análisis debe ser a nivel país, analizando el caso de cada región, ya que es posible que algunas regiones requieran mayores esfuerzos que otras.

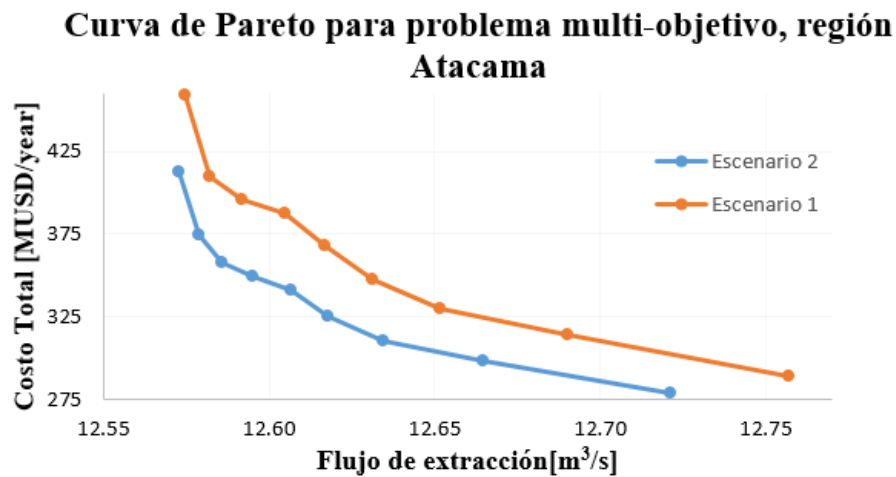


Figura 6.18: Curvas de Pareto parciales de escenarios 1 y 2 contrapuestos para la región de Atacama. Elaboración propia

Al igual que en el caso de Antofagasta, es difícil establecer la causa exacta de los resultados, sin embargo, con respecto a los grafos dados para la solución de importancias iguales en el problema multi-objetivo, y el análisis comparativo de la Tabla 6.6, se puede desprender lo siguiente:

- En ambos escenarios se usan plantas modificadas y se instalan nuevas plantas de reciclaje. Esto por lo dicho anteriormente, existe el mayor reciclaje posible debido a que el consumo industrial y domiciliario representan un 15 % aproximadamente de la demanda total.
- En ningún escenario se usa la red de recolección, pero la red de distribución es usada en el escenario 2 y no en el 1. Esto se puede deber a algunos factores que tienen relación con la distancia y flujos entre los nodos. Como se reconfigura la red de manera diferente en el escenario 2, puede ser más conveniente utilizar la red de distribución tanto por la distancia recorrida como por el valor de los flujos. En la Figura 6.19 se observa un diagrama simplificado de una planta de agua potable que envía sus flujos de salida a tres nodos de consumo. Si son flujos pequeños se disminuye el costo, de todas formas, sigue existiendo el trade-off entre costos y pérdidas de agua en la red de distribución.

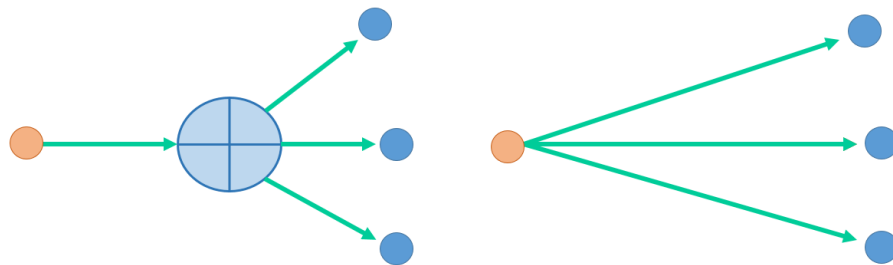


Figura 6.19: Ejemplificación para disminución en distancia recorrida utilizando distribución en comparación con no utilizar. A la izquierda se muestra el uso de la red de distribución y a la derecha, la conexión directa entre los nodos. Elaboración propia

- En el escenario 1 se mantienen dos plantas de tratamiento de agua potable, mientras que en el escenario 2 se mantiene solo una. Esto es porque, como el escenario 2 tiene mayor holgura, se prefiere dar más agua desde la fuente a consumo agrícola que a una planta de tratamiento, para disminuir los costos.
- En ambos escenarios se instalan nuevas plantas desalinizadoras en las tres provincias, ya que las 3 tienen acceso al mar. Actualmente no existen desalinizadoras de agua potable en Atacama, pero si se estudia implementar plantas modulares y desalinizadoras para consumo minero.
- En ambos escenarios se instalan plantas de tratamiento de aguas lluvias, por el bajo costo de instalación y de operación de las plantas. Con respecto a esto, y al igual que en el caso de Antofagasta, es necesario un análisis posterior sobre la mejor forma de instalar este tipo de plantas.
- Se puede deducir que el sistema de Atacama no tiene tanta movilidad como el sistema de Antofagasta, debido a que se debe extraer un flujo constante desde las fuentes naturales y de mar, debido a que el consumo agrícola es el nodo que más requiere agua, posee una elevada pérdida y el flujo de salida no se puede recircular, sólo se inyecta a napas subterráneas aumentando la capacidad de éstas de abastecer, pero siempre en menor razón que el flujo necesario para el consumo.
- El porcentaje de agua reciclada se acerca bastante al límite impuesto para cada caso. La diferencia puede nacer en que para algunos consumos es más conveniente tener menos agua reciclada por los costos que ésta genera, ya sea de transporte o de tratamiento de la misma.
- Se observa un aumento de casi el 250 % del costo en el caso del escenario 1 y 2, al compararlos con el costo total, mientras que el flujo de extracción aumenta casi 11 veces más. El aumento del costo en ambos escenarios se debe a que se instalan plantas nuevas, lo que genera mayor gasto de capital y operacional. Además, se cubre el 100 % de la demanda con agua potable, lo que también aumenta el costo. Esto también aumenta el flujo de extracción, ya que se pasa de un 9 % a 100 % de cobertura de demanda, por lo que es razonable que el flujo de extracción aumente.
- En este caso, si existe una correlación entre el escenario, el flujo de extracción y el costo total, donde los valores son levemente menores para el escenario 2. Sin embargo, se observa que para ambos escenarios el porcentaje de agua reciclada es el mismo. Esto pasa porque, como se mencionó anteriormente, el mayor consumo que se genera es agrícola, que no se puede reciclar, debido a que el agua se infiltra en los acuíferos. Ahora, los costos son menores en el escenario 2 debido a que los flujos se pueden reconfigurar internamente de una forma distinta, permitiendo una mayor libertad al momento de decidir los flujos y existencias de plantas. Es por esto, que el número de plantas es igual en ambos escenarios salvo en el caso de plantas de potabilización convencionales existentes (EP1), donde sólo existe 1 planta en el escenario 2, mientras que en el 1 existen 2.

6.4. Discusiones generales de resultados

Lo primero que se destaca es la lejanía de los puntos extremos de las curvas de Pareto, con los demás puntos intermedios. Esto pasa ya que los valores anti-ideales se tomaron como

los máximos de cada función. La metodología de programación por metas indica que, tal como existe un valor ideal, también existe un valor anti-ideal. Sin embargo, la curva de Pareto propiamente tal no necesariamente incluye el valor anti-ideal, por lo que el intervalo a considerar, cuando se normaliza la función objetivo, podría ser mayor. En la Figura 6.20 se tiene una frontera de Pareto para un problema convexo. Se observa que el valor anti-ideal (máximo) está lejos de la curva de Pareto, tanto para f_1 como para f_2 , por lo que los puntos que quedan en los extremos (combinaciones 1-0 o 0-1) quedarán en frontera de Pareto, pero probablemente lejos de los demás puntos. Así, no es extraño que las curvas de las Figuras 6.2, 6.5, 6.12 y 6.15 tengan este comportamiento, por lo que se analiza con mayor detalle las curvas de Pareto parciales.

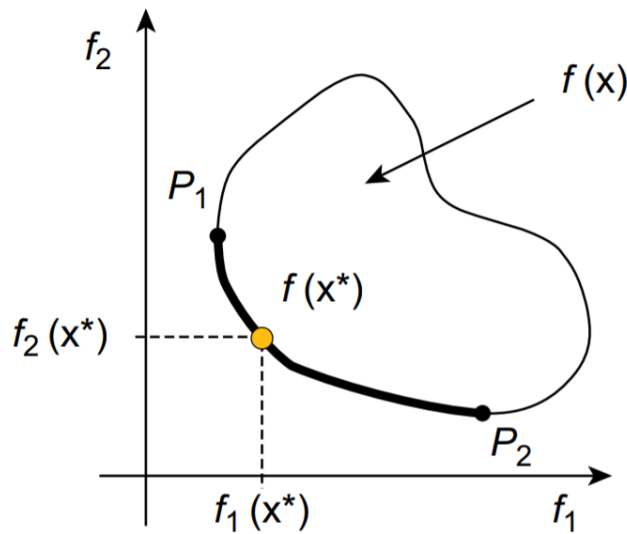


Figura 6.20: Curva de Pareto para un problema convexo [91].

Por otro lado, se observa que las curvas tienen una movilidad diferente cuando se cambia de escenario, lo cual es razonable. En el caso de Atacama, conviene siempre el escenario 2 por sobre el escenario 1, ya que el rango de flujos en los que opera el sistema es el mismo para ambos casos, pero el costo es menor cuando la barrera humana tiene un nivel del 70%. Para Antofagasta el análisis es más complejo ya que al tenerse más holgura, los costos son mayores, pero también aumenta el rango de flujos de extracción en los que opera el sistema, pudiendo lograr menores valores. Con esto, se puede ver que a barrera humana sí impacta en los sistemas pero lo hace de distinta forma, dependiendo de las características de cada lugar. Es por esto, que se hace necesario un análisis posterior para saber si es conveniente o no invertir en estrategias de marketing, donde influyen variables como:

- Percepción actual de la gente con respecto al agua reciclada.
- Variación de esta percepción ante problemáticas como el cambio climático, escasez de agua, contaminación del mar por agua desalada, etc.
- Importancia de estrategias comunicacionales adecuadas para el cambio en la percepción.
- Experiencia y tácticas internacionales.

Si se comparan ambas regiones, en particular, las curvas de Pareto entre escenarios dadas por las Figuras 6.18 y 6.8, se observa una diferencia clara entre ambas. En primer lugar, los rangos en los que se mueven los puntos de la curva son distintos, debido a que las características y necesidades de cada región son distintas. En segundo lugar, para Antofagasta se observa una diferencia importante entre ambos escenarios, situación que no se da en Atacama. Esto pasa por la distribución de los caudales que van hacia los distintos consumos. Antofagasta tiene un consumo agrícola que corresponde al 13 % del consumo total, cuyo flujo de salida no se puede reciclar, debido a que el agua se infiltra en napas o se evapora. Atacama tiene un consumo agrícola que corresponde al 85 %. No es de extrañar que los flujos de reciclaje de Atacama sean menores que los de Antofagasta (porque el agua de regadío no se puede recuperar), por lo que el flujo de extracción y los costos de Atacama se mueven en un rango similar para cualquier escenario, ya que existe una cota de reciclaje equivalente al 18 % del agua total. Este no es el caso de Antofagasta, que tiene una holgura mayor, por lo que puede extraer menos agua al aumentar el caudal de reciclaje.

Debido a lo anterior, la primera generalización que se puede extraer para cualquier región, es que el consumo agrícola va a imponer una cota sobre el flujo de reciclaje máximo que se puede tener en la región. Es por esto, que se debe analizar primero los consumos antes de establecer una estrategia para mover o no la barrera humana: puede ser que la barrera humana no impacte la solución debido a que la estructura del consumo de agua puede imponer un límite más restrictivo que la barrera humana al reuso de aguas servidas.

La segunda generalización, es que ambos casos de estudio presentan la instalación de nuevas plantas de tratamiento de aguas servidas para todos los escenarios. Esto parece indicar que se prefiere la instalación de nuevas plantas por sobre la modificación de las actuales, donde el principal motivo puede ser la capacidad de las plantas actuales o la ubicación de las mismas. Por esto, es posible que el problema pueda cambiar si se le da la opción de crecimiento a las plantas de tratamiento de agua servida existentes.

La tercera generalización que puede aplicar a cualquier región, es que se observa que en todas las soluciones se reduce el número de plantas de potabilización convencionales existentes. Esto parece indicar que la ubicación actual no es óptima en comparación con otras localizaciones y/o que la capacidad de tratamiento de estas plantas no es conveniente.

Otro punto que es importante mencionar, es que en todos los escenarios, y en ambas regiones, es conveniente la instalación de plantas de tratamiento de agua lluvia. A pesar de que la lluvia no significa un gran caudal, el costo de tratar este tipo de agua es bajo. Además, las lluvias que representan un mayor caudal llegan a lugares con mayor altura, por lo que el costo de distribución del agua es bajo, despreciándose el término asociado a la elevación de agua. Como fue dicho en las discusiones anteriores, es necesario un análisis detallado sobre la conveniencia de una planta grande de tratamiento de agua lluvia o de la instalación de sistemas pequeños para localidades pequeñas que no signifique un mayor costo de recolección. También analizar la conveniencia de instalación de cañerías para la recolección por sobre el sistema de recolección de laderas. En el presente trabajo se escogió el segundo tipo de recolección debido a la facilidad de implementación y a que es un sistema usado en zonas rurales, pero siempre se puede innovar en sistemas de recolección más eficientes.

La ubicación de las nuevas plantas de potabilización fue decidida de manera estratégica para que estuviera cercana a los principales centros de consumo y cerca de las fuentes respectivas. Por otro lado, la ubicación de las nuevas plantas de tratamiento de aguas servidas se decidió estableciendo una distancia mínima de aproximadamente 2 km de la población más cercana, para evitar molestias asociadas a olores o rechazo por parte de la comunidad, estando más lejos de las personas que algunas plantas actuales. Esto puede significar un mayor costo de transporte de agua, pero una mayor aceptación de la comunidad a un posible proyecto de este tipo. Cada supuesto tomado en secciones anteriores incide en las restricciones y parámetros impuestos en el problema, por lo que inciden en el óptimo encontrado. Si, por ejemplo, el consumo cambiase, podría ser que la solución óptima cambiase. Para estudiar esto, es posible realizar un análisis post-óptimo, tal como la determinación de los rangos de estabilidad de los parámetros frente a cambios en los supuestos realizados.

Unas de las simplificaciones más fuertes se realizó sobre las redes de recolección y distribución, debido a varios aspectos. Primero, las pérdidas de agua durante la recolección y distribución se produce a través de múltiples factores, puede ser por fugas en una planta elevadora, fugas en las cañerías, fugas por mal uso de agua, etc. Así, es difícil saber en qué lugar geográfico se está produciendo la pérdida. Por otro lado, el valor de la pérdida también es de difícil cuantificación. Dependiendo de las condiciones del suelo y del nivel de aguas subterráneas, puede ser que la presión externa rompa la tubería y se infiltre hacia la cañería, generando problemas tanto para la recolección (principalmente aumento del costo de tratamiento y transporte) como para la distribución (principalmente pérdida en la calidad del agua). Un estudio más profundo se escapa a los límites de la presente memoria, pero se recomienda que, una vez identificados los principales problemas según tipo de suelo, localidad, y empresa sanitaria asociada, se pueda comenzar a establecer de mejor forma las pérdidas o infiltraciones de agua que existan.

Finalmente es importante mencionar, que la red óptima encontrada es diseñada para los consumos actuales, sin embargo, estos pueden variar en el futuro al igual que la oferta de agua. Estos cambios pueden medirse a través de la incorporación de estrategias de optimización bajo incertidumbre.

Capítulo 7

Consideraciones finales

De las discusiones realizadas en todas las secciones anteriores, se pueden desprender algunas consideraciones generales. En primer lugar, se hace necesario el estudio en profundidad de las fuentes subterráneas, su dinámica e interacción con el medio. Además, mejorar las estaciones de medición tanto de lluvias como de flujos, para tener datos precisos al momento de hacer estudios. En segundo lugar, se puede perfeccionar la estimación de algunos parámetros y ubicaciones de nodos. Así, la determinación de estos aspectos del modelo se considera la principal desventaja, ya que se requieren muchos estudios previos para poder establecer de manera correcta las bases del problema.

Por otro lado, el modelo podría perfeccionarse al permitir otros tipos de participantes o conexiones, por ejemplo, instalando plantas cuya calidad sea de riego, que no requieran una barrera humana y cuyo costo de tratamiento disminuya. El objetivo del presente estudio es abastecer con agua potable, pero considerar otras calidades disminuiría considerablemente los costos.

El modelo general es funcional y sirve para el objetivo que se planteó: encontrar una red óptima para ciudades con escasez hídrica. El resultado es una matriz variada de fuentes de agua lo que podría generar una mayor seguridad y estabilidad del sistema completo (se pueden hacer estudios para corroborar esta hipótesis). Además, el modelo pudo implementarse a dos casos de estudio distintos, con índice de escasez de agua superior al 80%. Así, su principal ventaja es que se puede aplicar a cualquier región del país ya que considera todas las fuentes de agua posibles: fuentes superficiales, subterráneas, lluvias, reciclaje y mar. Con esto, se pueden cambiar los parámetros y algunos elementos de los conjuntos, para obtener la red óptima en cualquier otra región, pero las restricciones y la forma de concebir el problema, es aplicable a cualquier ciudad o región.

Un problema que no considera el presente trabajo son las restricciones legales. Los derechos de agua, de la forma que están concebidos actualmente, representan un dilema al momento de establecer redes de agua, generando la gran pregunta: ¿de quién es el agua? ¿quién se hace responsable por su correcta distribución? ¿por qué existe gente que actualmente no tiene acceso a agua potable en zonas donde existe una abundancia de lluvias y fuentes de

agua?. Estas preguntas son cuestionadas periódicamente por la población y generalmente no pueden llegar a respuestas por diversos motivos: problemas legislativos, vacíos legales, mala gobernanza hídrica, etc. Diversas organizaciones sociales han intentado llevar este tema a la mesa política exigiendo un cambio en el Código de Aguas actual que no sólo considere al agua como un bien al cual se le puede sacar provecho económico, si no que también considere formas menos utilitaristas y que aseguren el derecho humano de acceso al agua y su saneamiento.

Por otro lado, también se plantean algunas preguntas relacionadas con la planificación de una ciudad considerando el manejo del agua, tales como: ¿tiene sentido usar agua para cultivar en zonas de escasez?, ¿qué tipo de cultivos tiene sentido desarrollar en la región?, ¿es posible planificar considerando que el acceso a agua está garantizado para la población?, ¿se debe garantizar el acceso a agua de cualquier actividad industrial?, ¿se debe priorizar el consumo potable por sobre el consumo industrial y agrícola?. Cuando la sociedad encuentre las respuestas a estas preguntas, se pueden incluir en el modelo propuesto en la presente memoria, y podría representar un rol metodológico para la planificación ética y estratégica de la gestión hídrica.

Finalmente, se puede deducir que el problema del agua requiere de especial análisis y que la metodología presentada en este estudio puede ser aplicada, en conjunto con otras estrategias, para decidir de forma óptima una red de agua y los componentes a instalar. Estos esfuerzos deberían estar enfocados en abastecer a toda la población y no centrarse en los territorios operacionales de las empresas individuales de cada región, si no que se debe hacer un trabajo conjunto de colaboración y cooperación entre empresas, comunidades y actores políticos, para generar una red sustentable y que no agudice la crisis hídrica.

Capítulo 8

Conclusiones

A partir del trabajo realizado fue posible caracterizar las zonas geográficas con mayor escasez hídrica en Chile, siendo estas las regiones de Antofagasta y Atacama. Se establecieron los principales ríos, sus caudales y usos, encontrando los principales consumos y empresas sanitarias encargadas de tratar las aguas en ambas regiones. Esto permitió elaborar una superestructura la red de agua actual, realizando un balance de masa global para cada caso.

Con el estudio de las empresas sanitarias responsables de cada región, se pudieron investigar las tecnologías utilizadas actualmente para tratar el agua potable, analizando sus características y costos. Además de esto, se investigaron las tecnologías de tratamiento para otras fuentes alternativas de agua: desalinización, planta de tratamiento de aguas lluvias, y plantas de tratamiento de aguas servidas con calidad de salida potable. Esto permitió seleccionar las tecnologías adecuadas para cada tipo de planta, asegurando siempre una calidad potable, independiente del tipo de consumo que se le asigne. Se pudieron establecer costos de operación y de instalación tanto de las plantas de tratamiento como de la red de tuberías.

Con todo lo anterior, se modeló la red de agua como un grafo y se comenzó el planteamiento del modelo matemático de la red, estableciendo restricciones relacionadas a balances volumétricos, cumplimiento de demanda, capacidades máximas de tratamiento, relaciones lógicas de existencia, límite de flujos, costos, restricciones ambientales relacionadas al indicador *Water Flow Regulation Service* y restricciones sociales relacionadas a la barrera humana, término que se describe como el nivel de rechazo que posee la población para consumir agua reciclada. Para determinar este último parámetro es necesario hacer encuestas de percepción. Como esto escapa a los límites del presente trabajo, se fijaron dos escenarios con una barrera humana distinta para cada uno: 30% para el escenario 1, y 70% para el escenario 2.

Se seleccionaron dos indicadores: uno económico y otro medioambiental. El primero se relaciona con los costos totales de la red, mientras que el segundo se relaciona con los flujos de extracción de agua, reduciendo el consumo de agua de mar, subterránea y superficial. Así, se formuló un problema mixto lineal que se resolvió mediante la técnica de programación por

metas en la herramienta computacional GAMS.

Con todo lo anterior, fue posible crear un modelo de optimización que rediseña las redes de agua, integrando nuevas fuentes hídricas: reciclaje, tratamiento de agua lluvia y desalinización.

Las soluciones óptimas del modelo indican que, si se comparan ambos escenarios dados por una barrera humana distinta, entonces existe una diferencia económica y/o ambiental. En el caso de Antofagasta, el costo aumenta casi un 50 % en el caso del escenario 1 y un 100 % en el caso del escenario 2, en comparación con la situación actual. En Atacama, el costo aumenta en aproximadamente un 250 % en ambos escenarios. La diferencia entre los aumentos de ambas regiones se debe principalmente a que Antofagasta pasa de una cobertura de la demanda de 28 % a 100 %, mientras que Atacama pasa de 9 % a 100 %. La diferencia entre los costos es considerablemente mayor, pero es acorde con lo mencionado anteriormente. Por otro lado, para Atacama no se muestra una gran diferencia entre los resultados de ambos escenarios, esto es debido a que el consumo agrícola representa un 85 % del consumo total y es un flujo que no se puede reciclar, por lo que impone una cota de reuso de agua menor a la impuesta por la barrera humana.

Como generalización para cualquier región, es posible destacar que antes de aplicar cualquier estrategia de marketing para mover la oposición social, es necesario conocer la distribución de demandas para evaluar la factibilidad del reciclaje. También se espera que las soluciones óptimas no incluyan las plantas actuales, probablemente por la ubicación de éstas. Además, se puede presumir que conviene siempre instalar plantas de tratamiento de agua lluvia debido a su bajo costo de instalación y operación.

De los grafos obtenidos se puede concluir que el hecho de reciclar es una opción viable, y que es posible abastecer a la población con una matriz hídrica completamente diversificada, utilizando todas las fuentes posibles: agua de mar, de lluvia, subterránea, superficial y de reciclaje. Esto puede significar una ventaja ya que tiene relación con el nivel de seguridad del suministro: tener solo una fuente podría tener mayores consecuencias frente a fallas, que contar con otras alternativas para suplir ese caso.

El presente trabajo se puede aplicar a cualquier región del país, o a otras zonas del mundo, siendo esta la principal ventaja del modelo. Sin embargo, es pertinente mejorar la cuantificación de los parámetros y abrir la posibilidad de permitir calidades diferentes dentro de la red, como lo es el agua de riego.

Como trabajo futuro, se propone incluir aspectos relacionados a incertidumbre con cambios en las leyes, consumos, lluvias y oferta de los ríos y fuentes subterráneas. También se puede incluir otras funciones objetivo sociales e incluir a la comunidad en la toma de decisiones. Además, se puede hacer un análisis multicriterio para encontrar las importancias relativas óptimas reales, ya que se hizo un análisis para la solución dada para importancias del 50 %, la cual podría variar.

Finalmente, el modelo propuesto sirve como base para una mejor gestión del recurso hídrico, pudiendo complejizarse aún mas para permitir responder otras preguntas. Así, se

puede utilizar como una guía metodológica para tomadores de decisiones, al momento de planificar de forma óptima una red de agua dentro del contexto de ciudad.

Glosario

- **Escasez de agua:** *Es la abundancia volumétrica, o la falta de ella, del suministro de agua. Esto se calcula típicamente como una relación entre el consumo de agua humana y el suministro de agua disponible en un área determinada [4].*
- **Estrés hídrico:** *Se refiere a la capacidad, o la falta de ella, para satisfacer la demanda humana y ecológica de agua. Esta considera varios aspectos físicos relacionados con los recursos hídricos (cantidad y disponibilidad), incluida la escasez de agua, pero también la calidad del agua, los caudales ambientales y el acceso al agua [4].*
- **Crisis hídrica:** *Se define como una disminución en la calidad y cantidad disponible de agua dulce, al grado de generar efectos nocivos para la salud humana y/o la actividad económica [4].*
- **Red de agua:** En el presente trabajo se utilizará el término 'red de agua' como el conjunto de participantes de un sistema de agua desde su extracción hasta su disposición, incluyendo a consumidores, plantas de tratamiento, distribución, recolección, pérdidas, entre otros.
- **Grafo:** Representación gráfica o simbólica de un sistema constituido por nodos y unidos por arcos [92]
- **Uso consuntivo del agua:** Uso en el cual se consume el agua desde la fuente que se extrajo [93].
- **Uso no consuntivo del agua:** Uso en el cual no se consume el agua desde la fuente, es decir, el agua es devuelta una vez utilizada [93].
- **Dominancia de Pareto:** Un vector de variables de decisión u se dice que es *Pareto Dominante* sobre otro vector v , $u < v$, si y solo sí se cumple: [94]

$$\forall i \in \{1, \dots, N\}, F_i(u) \leq F_i(v)$$

y, simultáneamente:

$$\exists j \in \{1, \dots, N\}, F_j(u) < F_j(v)$$

- **Solución óptima de Pareto:** Una solución u del problema de optimización es óptimo de Pareto, si no existe otra solución que la domine, es decir $\nexists v \in \Omega, v < u$ [94].
- **Conjunto de Pareto (CP):** Conjunto de todas las soluciones óptimas de Pareto: $\{x^* | \nexists x \in \Omega, x < x^*\}$ [94].
- **Frente/curva/frontera de Pareto (FP):** Valores asociados a los vectores de funciones objetivo del conjunto de Pareto, toma forma de curva: $\{F(x) | x \in CP\}$ [94].
- **PTAP:** Planta de tratamiento de agua potable.

- **PTAS:** Planta de tratamiento de agua servida.
- **PTOI:** Planta de tratamiento de osmosis inversa.
- **PTAR:** Planta de tratamiento de residuos líquidos industriales.
- **RILes:** Residuos líquidos industriales.
- **PEAP:** Planta de elevación de agua potable.
- **PEAS:** Planta de elevación de agua servida.
- **Áreas de escurrimientos:** Zona recorrida por el río, desde su inicio hasta su desembocadura [25].
- **LP:** *Linear Programming*. Se refiere a problemas de programación lineales continuos.
- **MILP:** *Mixed Integer Linear Programming*. Se refiere a problemas de programación mixtos lineales continuos.
- **NLP:** *Non Linear Programming*. Se refiere a problemas de programación no lineales continuos.
- **MINLP:** *Mixed Integer Non Linear Programming*. Se refiere a problemas de programación mixtos lineales no continuos.
- **ETc:** Evapotranspiración del cultivo.
- **ETo:** Evapotranspiración de referencia.
- **OpC:** Costos operacionales.
- **CapC:** Costos de capitales.
- **WC:** *Water Flow Regulation Service*. Indicador ecológico que indica la regulación de un sistema acuático.

Bibliografía

- [1] SANTIBÁÑEZ, F. El cambio climático y los recursos hídricos en Chile, 2018.
- [2] FUNDACIÓN CHILE. Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile, 2018.
- [3] LÓPEZ, A. Necesidad de la planificación de los recursos hídricos en países en vías de desarrollo. [En línea], 2013.
- [4] BAEZA, E. Sequía y Escasez Hídrica: conceptos relacionados, situación actual y experiencia comparada en varios países para abordar el problema, 2018.
- [5] INTA. Qué es el fenómeno de El Niño. [En línea]. <<https://bit.ly/1LEuFvA>>, 2019. [Fecha de consulta: 20 de junio de 2019].
- [6] SHOA. ENOS. El niño Oscilación Sur. [En línea]. <<https://bit.ly/2JtZMOn>>, 2019. [Fecha de consulta: 01 de julio de 2019].
- [7] Decreto con Fuerza de Ley 1122, 13 agosto de 1981. FIJA TEXTO DEL CÓDIGO DE AGUAS. En Biblioteca del Congreso Nacional.
- [8] BANCO MUNDIAL. Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos, 2011.
- [9] MINISTERIO DEL INTERIOR Y SEGURIDAD PÚBLICA. Política Nacional para los Recursos Hídricos. Chile, 2015.
- [10] INSTITUTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE SALUD. Tasa de crecimiento de la población chilena. [En línea]. <<https://bit.ly/2FUPo1m>>, 2018. [Fecha de consulta: 02 de junio de 2019].
- [11] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2015. Chile, 2013.
- [12] SALADIN, P. Modelos de gestión del agua. [En línea]. <<https://bit.ly/32cuBzF>>, 2015. [Fecha de consulta: 02 de junio de 2019].
- [13] IGLESIAS, J. Modelos de gestión actuales y futuros: La Integración en los Sistemas de

- Gestión. [En línea]. <<https://bit.ly/2NzjnSD>>, 2016. [Fecha de consulta: 02 de julio de 2019].
- [14] GORMAZ-CUEVAS, D., RIFFO-RIVAS, J., MONTASTRUC, L., DÍAZ-ALVARADO, F., BRUNING, M. A Multi-Objective Optimization Model to Plan City-Scale Water Systems with Economic and Environmental Objectives: A Case Study in Santiago, Chile. Unpublished.
- [15] VALENZUELA, GUILLERMO AND ARENAS, FERNANDO AND VERA, GABRIELA AND PEÑA, DANIEL. Indicadores de Sustentabilidad y su Selección Responsable. Optimización sustentable de procesos. [Diapositiva]. Santiago. Universidad de Chile, 2018.
- [16] LINARES, P., FERRER, J., SANCHEZ, J., RAMOS, P. Modelos matemáticos de optimización. Universidad Pontificia Comillas. [En línea]. <<https://bit.ly/3hG5hcp>>, 2010. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].
- [17] PEIROVI, R., AFSHARNIA, M., MOGHADDAM, A., ASGHAR, A., ASKARISHAHI, M., MOKHTARI, M. Calibration of water quality model for distribution networks using genetic algorithm, particle swarm optimization, and hybrid methods. Methods X, Vol 6: 540–548, 2019.
- [18] PÉREZ, S., PONCE-ORTEGA, J., JIMÉNEZ-GUTIÉRREZ, A. A multi-objective optimization approach for sustainable water management for places with over-exploited water resources. Computers and Chemical Engineering, Vol 121: 158–173, 2019.
- [19] RANGAIAH, GADE AND BONILLA-PETRICIOLET, ARIÁN. Multi-objective Optimization: Techniques and Applications in Chemical Engineering. Vol. 1. 2013.
- [20] RAMOS, A. Optimización multicriterio. [En línea]. <<https://bit.ly/2XvM6fM>>, 2015. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].
- [21] LIU, S., KONSTANTOPOULOU, F., GIKAS, P., PAPAGEORGIU, L. A mixed integer optimisation approach for integrated water resources management. Computers and Chemical Engineering, Vol 35: 858–875, 2011.
- [22] ROJAS, M., GUILLÉN [U+2010] GOSÁLBEZ, G., NÁPOLES-RIVERA, F., PONCE-ORTEGA, J., JIMÉNEZ ESTELLER, L., SERNA-GONZÁLEZ, M. Multi-objective optimization for designing and operating more sustainable water management systems for a city in Mexico. AIChE Journal, Vol 61, 03 2015.
- [23] Panel Crisis Hídrica en Chile: Desafíos para el presente y el futuro desde distintas perspectivas. 5 de Junio de 2019. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Chile.
- [24] CHILENA., M. Geografía cultural de Chile. [En línea]. <<https://bit.ly/2ZvtzB6>>, [Fecha de consulta: 05 de agosto de 2019].

- [25] P. PEDRO DE VALDIVIA. Síntesis geográfica de Chile: Territorio y Geografía Física. [En línea]. <<https://bit.ly/2eQhPQG>>, 2013. [Fecha de consulta: 05 de agosto de 2019].
- [26] BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. Hidrografía. [En línea], [Fecha de consulta: 06 de agosto de 2019].
- [27] DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Mapa hidrogeológico de Chile. Santiago, Chile., 1986.
- [28] BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. Región de Antofagasta. [En línea]. <<https://bit.ly/2ZAI5Bs>>, [Fecha de consulta: 10 de agosto de 2019].
- [29] CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES. Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos. Chile., 2016.
- [30] ARCADIS. Plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, Región de Antofagasta. Chile, 2016.
- [31] DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. [En línea]. <<http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>>, [Fecha de consulta: 10 de enero de 2020].
- [32] CENTER FOR CLIMATE AND RESILIENCE RESEARCH. Datos de precipitación. [En línea]. <<https://bit.ly/2zITl5H>>, [Fecha de consulta: 16 de agosto de 2019].
- [33] BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. Hidrografía Región de Antofagasta. [En línea]. <<https://bit.ly/3gTcMx5>>.
- [34] DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS. Evaluación de los Recursos HSubterráneos de los sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento común Ojos de San Pedro y Pampa Peineta. Inf. téc., Ministerio de Obras Públicas, 2014.
- [35] CADE IDEPE CONSULTORES. Diagnostico y Clasificación de los cursos y cuerpos de Agua según objetivos de Calidad. Cuenca Salar de Atacama., 2004.
- [36] SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS. Visor Geonodo para empresas sanitarias. <<https://bit.ly/2G3DdPj>>, [Fecha de consulta: 10 de enero de 2020].
- [37] BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. Región de Atacama. [En línea]. <<https://bit.ly/2JhySbl>>, [Fecha de consulta: 25 de agosto de 2019].
- [38] JULIÁ, CRISTOBAL AND MONTECINOS, SONIA AND MALDONADO, ANTONIO. Características climáticas de la Región de Atacama. [En línea]. <<https://bit.ly/2m2j6u4>>, 2008. [Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2019].
- [39] GOBIERNO REGIONAL DE ATACAMA. Sistema Territorial, Cuencas Hidrográficas.

- <<https://bit.ly/2mnpJqX>>, 2019. [Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2019].
- [40] CADE IDEPE CONSULTORES. Diagnostico y Clasificacion de los cursos y cuerpos de Agua segun objetivos de Calidad. Cuenca del Rio Copiapo.ri, 2004.
- [41] CORVALÁN, M. Contraloría detecta serias deficiencias en gestión de derechos de agua. [En línea]. <<https://bit.ly/2kYWTNc>>, 2014. [Fecha de consulta: 25 de agosto de 2019].
- [42] SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS. Manual para el Hogar. Ministerio de Obras Públicas.
- [43] FAO. Evapotranspiración del cultivo. [En línea]. <<https://bit.ly/2BJBNuM>>, [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [44] ECHEVERRÍA, E. Normativas y reglamentaciones: Calidad del agua para consumo humano. [En línea]. <<https://bit.ly/2YIcWOo>>, 2015. [Fecha de consulta: 02 de julio de 2019].
- [45] DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. [En línea]. <<https://bit.ly/1VZ4Poh>>, 2001. [Fecha de consulta: 03 de julio de 2019].
- [46] Decreto con Fuerza de Ley 21075, 15 febrero de 2018. Regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises. En Biblioteca del Congreso Nacional.
- [47] ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. Procesos de Tratamiento de Agua. [En línea]. <<https://bit.ly/2c3c4x5>>, [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [48] GRUPO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y MEDIOAMBIENTAL. Tema 5. Floculación Coagulación. [En línea]. <<https://bit.ly/2c3cOlv>>, [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [49] TRATAMIENTO DEL AGUA MÉXICO. Floculantes o ayudantes de coagulación. [En línea]. <<https://bit.ly/3cpEVs4>>, [Fecha de consulta: 06 de abril de 2020].
- [50] SAMSA. Proceso de potabilización del agua. [En línea]. <<https://bit.ly/2OXVJLQ>>, 2008. [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [51] ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. Clarificación de agua por flotación con aire disuelto. [En línea]. <<https://bit.ly/2YAx2R>>, [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [52] ALASINO, N. Síntesis y Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. [En línea]. <<https://bit.ly/2Xw0pkn>>, 2009. [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [53] CYCLUS ID. Tratamiento Terciario. [En línea]. <<https://bit.ly/2hEVHcX>>, 2019.

[Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].

- [54] HIDROQUIVIR, S.L. La salubridad del agua del grifo. [En línea]. <<https://bit.ly/2Y6Y6Ia>>, 2016. [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [55] PAÍS CIRCULAR. Desalación de agua de mar en Chile. [En línea]. <<https://bit.ly/2Jrc7TG>>, 2018. [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [56] MINERÍA CHILENA. Plantas desaladoras: Una solución con pros y contras. [En línea]. <<https://bit.ly/2NBjHAa>>, 2018. [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [57] MINISTERIO DE SANIDAD Y POLÍTICA SOCIAL. Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. España. <<https://bit.ly/2JigpgY>>, 2009.
- [58] MINISTERIO DEL INTERIOR Y SEGURIDAD PÚBLICA. Captación y aprovechamiento de agua lluvia en América Latina: Experiencias y Conclusiones de un debate. Chile., 2016.
- [59] PIZARRO, R., ABARZA, A., MORALES, C., CALDERÓN, R., TAPIA, J., GARCIA, P., CÓRDOVA, M. Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile. Inf. téc., Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe, 2015.
- [60] RAINTER. Singapore Water Resource. [En línea]. <<https://bit.ly/2Jq7x82>>, 2015. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].
- [61] RALCEA. Aprovechamiento y Reuso de Aguas Residuales. [En línea]. <<https://bit.ly/2S2up1l>>, 2013. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].
- [62] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guidelines for Water Reuse. Estados Unidos, 2012.
- [63] PURETEC. What is Reverse Osmosis?. [En línea]. <<https://bit.ly/2JN3UIH>>, 2019. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].
- [64] PURETEC. Multi- Media Filtration. [En línea]. <<https://bit.ly/2NzpAxV>>, 2019. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].
- [65] TERNA, O., AHMED, R., HWA, J. Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling. Membranes (Basel), 33: 6, 6 2016.
- [66] MINNESOTA DEPARTMENT OF HEALTH. Water Treatment Using Carbon Filters: GAC Filter Information. [En línea]. <<https://bit.ly/32byYLg>>, 2019. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].

- [67] AQUANETTO. Ultraviolet irradiation. [En línea]. <<https://bit.ly/2Xx68BA>>, 2019. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].
- [68] HIDALGO, F. Y GUAMAN, M. Diseño y construcción de un Desmineralizador de lecho múltiple. [En línea]. <<https://bit.ly/32bYuQK>>, 2006. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].
- [69] PONCE, E. Capítulo 6. Desinfección con Ozono. [En línea]. <<https://bit.ly/325cdZs>>, 2005. [Fecha de consulta: 05 de julio de 2019].
- [70] AGUAS ANTOFAGASTA. Descripción. [En línea]. <<https://bit.ly/35UI3ZU>>, [Fecha de consulta: 05 de noviembre de 2019].
- [71] AGUAS ANTOFAGASTA. Ruta del Agua. [En línea]. <<https://bit.ly/34QYFBG>>, [Fecha de consulta: 05 de noviembre de 2019].
- [72] AGUAS CHAÑAR. Informe sexto proceso tarifario. Período 2014-2019. Chile.
- [73] EMPRESA CONCESIONARIA DE SERVICIOS SANITARIOS S.A. Estudio de Impacto Ambiental. Planta Desalinizadora de Agua de Mar para La Región de Atacama, Provincias de Copiapó y Chañar., 2014.
- [74] AGUAS CHAÑAR S.A. Planta de Tratamiento de Agua Potable de Osmosis Inversa, Planta Nantoco, Comuna de Tierra Amarilla, Aguas Chañar S.A., 2010.
- [75] BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. Funcionamiento e Impacto Ambiental del Proceso de Desalinización de Agua de Mar. [En línea]. <<https://bit.ly/2sWA4xn>>, 2016. [Fecha de consulta: 02 de diciembre de 2019].
- [76] PRENSA GS INIMA. Planta desalinizadora de agua mediante ósmosis inversa. [En línea]. <<https://bit.ly/2rinBnu>>, 2019. [Fecha de consulta: 02 de diciembre de 2019].
- [77] HERNÁNDEZ, M. Guía para la remineralización de las aguas desaladas. España., 2010.
- [78] ARRAU INGENIERÍA E.I.R.L. Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta. Inf. téc., Ministerio de Obras Públicas., 2012.
- [79] ICNOVA ING CONSULTORES. Determinación de precios unitarios eficientes, Tarifas 2014-2019. Anexo Informe de Intercambio, 2013.
- [80] AGUAS ANDINAS S.A. Estudio Tarifario Definitivo, 2015.
- [81] RUZ, J. Introducción a la programación matemática, Máster universitario en Ingeniería de Sistemas y de Control. Madrid. [En línea]. <<https://bit.ly/2DTlaKw>>.
- [82] SAVELSKI, M., BAGAJEWICZ, M. On the necessary conditions of optima-

lity of water utilization systems in process plants with multiple contaminants. Chemical Engineering Science, Vol. 58: 5349–5362, 12 2003.

- [83] SONG, Z. The Evaluation of Parameter M in the Big M Method of Linear Programming. 01 2015.
- [84] CRECES, CIENCIA Y TECNOLOGÍA. Las aguas servidas pueden convertirse en agua de riego, gas, electricidad y abono. [En línea]. <<https://bit.ly/35dXuf9>>.
- [85] ONAINDIA, M.E.A. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation. Forest Ecology and Management, 289: 1–9, 2012.
- [86] ANISYA, G., SWARA, G. Implementation Of Haversine Formula And Best First Search Method In Searching Of Tsunami Evacuation Route. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 97: 012004, 12 2017.
- [87] VIVANCO, E. Impacto Ambiental de Desalinización de Agua de Mar. Inf. téc., Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones, 2017.
- [88] ROZIN, P., HADDAD, B., NEMEROFF, C., SLOVIC, P. Psychological aspects of the rejection of recycled water: Contamination, purification and disgust. Judgment and Decision Making, Vol. 10: 50, 2015.
- [89] HURLIMANN, A., DOLNICAR, S. When Public Opposition Defeats Alternative Water Projects - the Case of Toowoomba Australia. Water Research, Vol. 44: 287–297, 2010.
- [90] GAMS. CPLEX 12. [En línea]. <<https://bit.ly/3gDkYjO>>, [Fecha de consulta: 04 de julio de 2019].
- [91] BRISSET, S., GILLON, F. Approaches for multi-objective optimization in the ecodesign of electric systems, págs. 83–97. 12 2015.
- [92] ÁLVAREZ, M. Y PARRA, J. Teoría de Grafos. Chile, 2013. [Fecha de consulta: 01 de julio de 2019].
- [93] PROFORMA. Tipología de los usos del agua. [En línea]. <<https://bit.ly/2twDljG>>, [Fecha de consulta: 01 de julio de 2019].
- [94] VALENZUELA, G., ARENAS, F., VERA, G. Y PEÑA, D. Curva de Pareto. Curso Optimización sustentable de procesos. [Diapositiva] . Santiago. Universidad de Chile, 2018.
- [95] DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Red Hidrométrica. [En línea]. <<https://bit.ly/1kuNWxg>>, [Fecha de consulta: 15 de agosto de 2019].
- [96] DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos. [En línea]. <<https://bit.ly/2RTrsQt>>, [Fecha de consulta: 20 de agosto de 2019].

- [97] ARCGIS. Inventario Público de Cuencas Hidrográficas. [En línea]. <<https://bit.ly/2m8HE4v>>, [Fecha de consulta: 20 de agosto de 2019].
- [98] SOY CHILE. Censo 2017 arrojó que en la Región de Antofagasta hay 607.534 habitantes. [En línea]. <<https://bit.ly/2HAnB70>>, 2017. [Fecha de consulta: 10 de agosto de 2019].
- [99] DIVISIÓN DE PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO. Informe técnico: Sistema Territorial Cuencas Hidrográficas, Región de Atacama, 2019.
- [100] UNIÓN TEMPORAL DE PROVEEDORES HÍDRICA CONSULTORES SPA Y AQUATERRA INGENIEROS LTDA. Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile, 2017.
- [101] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. División Político Administrativa y Censal, Región de Atacama. Chile., 2019.
- [102] COLINA, M. Filtración por membrana. Universidad Autónoma Metropolitana, México. [En línea]. <<https://bit.ly/3dwOjLT>>, [Fecha de consulta: 15 de abril de 2020].
- [103] OROZCO, L., NAVA, P., GUARNEROS, C., CABALLERO, F. Filtración de agua por membranas. México. [En línea]. <<https://bit.ly/3dI38eo>>, 2019. [Fecha de consulta: 06 de abril de 2020].
- [104] FUNDACIÓN CENTRO CANARIO DEL AGUA. Introducción a los bioreactores de membranas, 2003.
- [105] GRUPO TAR BIOINGENIERÍA. Manual del carbón activo.
- [106] SÁNCHEZ, C. Intercambio iónico (FT-TER-006). Inf. téc., Universidade da Coruña.
- [107] TIGRE. Polietileno Alta Densidad. Catálogo Técnico. Inf. téc., 2016.
- [108] VINILIT. TUBERÍAS DE POLIETILENO – HDPE DURATEC VINILIT. [En línea]. <<https://bit.ly/2SL6Uw0>>, 2006.
- [109] CHEMICAL ENGINEERING. CEPCI UPDATES. <<https://www.chemengonline.com/>>.
- [110] MIGNARD, D. Correlating the chemical engineering plant cost index with macro-economic indicators. Chemical Engineering Research and Design, Vol. 92: 285–294, 2013.
- [111] RODRIGUEZ MIRANDA, J., GARCÍA-UBAQUE, C., LONDOÑO, J. Analysis of the investment costs in municipal wastewater treatment plants in Cundinamarca. DYNA, Vol. 82: 230–238, 08 2015.
- [112] GUO, T., ENGLEHARDT, J., WU, T. Review of cost versus scale: water and waste-

water treatment and reuse processes. Water Science and Technology, Vol. 69: 223–234, 2014.

- [113] MCGIVNEY, W., KAWAMURA, S. Cost estimating manual for water treatment facilities. John Wiley and Sons Inc., 2008.
- [114] MUNICIPAL TECHNOLOGY BRANCH. Wastewater Technology Fact Sheet Chlorine Disinfection. Inf. téc., Environmental Protection Agency, 1999.
- [115] SOTO, G., SOTO, M. Desalación de agua de mar mediante sistema Osmosis Inversa y Energía Fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, Región de Coquimbo. Inf. Téc. 33, PHI Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe, 2013.
- [116] SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS. Desalinización en el sector sanitario chileno, Cámara de diputados de Chile.
- [117] AGUAS CHAÑAR S.A. Declaración de Impacto Ambiental: Planta de Tratamiento de Agua Potable de Osmosis Inversa, Planta Nantoco, Comuna de Tierra Amarilla, Aguas Chañar S.A. RCA 145/2011. Servicio de Evaluación Ambiental, 2011.
- [118] AGUAS DE CHILE LTDA. Declaración de Impacto Ambiental: Planta Desalinizadora de Antofagasta, II Región RCA 54/1999. Servicio de Evaluación Ambiental, 1999.
- [119] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. Precio medio de Mercado. [En línea]. <<https://bit.ly/2MoXGRO>>, 2019. [Fecha de consulta: 06 de abril de 2020].

Anexos

Anexo A

Caracterización hídrica y geográfica de Antofagasta

A continuación se presenta una serie de datos importantes para la configuración de algunos parámetros exclusivos de Antofagasta.

La región está dividida en 3 provincias, Antofagasta, El Loa y Tocopilla, las cuales se observan en la Figura A.1. Esta división es importante para el problema ya que muestra la distribución geográfica que pueden tener distintos parámetros como lluvias, consumos, etc.



Figura A.1: Provincias en la región de Antofagasta. Elaboración propia en Google Earth ®.

Para poder analizar las precipitaciones, se estudiaron los datos históricos dados por las estaciones meteorológicas vigentes de la Dirección General de Aguas mostradas en la Figura A.2 [31].

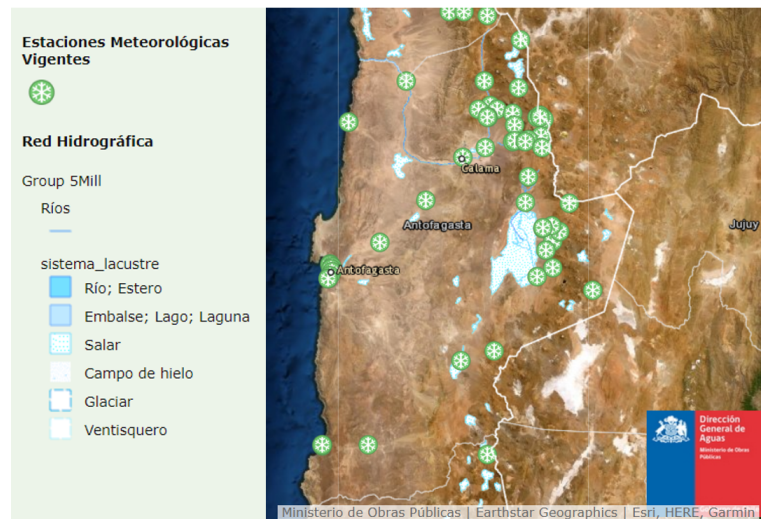


Figura A.2: Red hidrométrica de Antofagasta [95].

Los valores de precipitaciones mensuales por estación extraídos desde la Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea de la Dirección General de Aguas se pueden revisar en los siguientes link [31]:

- <https://bit.ly/2SP9iRz> para la provincia de Antofagasta.
- <https://bit.ly/3dwM0rO> para la provincia de El Loa.
- <https://bit.ly/3ckKXe6> para la provincia de Tocopilla.

Estos datos sirven para establecer patrones de lluvias en distintos puntos de la región. Las estaciones climatológicas que se seleccionaron para el presente estudio son las que se encuentran relativamente cerca de los ríos principales o que poseen una medición promedio superior a 80 (mm/año). Estas estaciones se pueden observar en la Figura A.3. Para ver las estaciones que se encuentran al noreste de El Loa, ver Figura

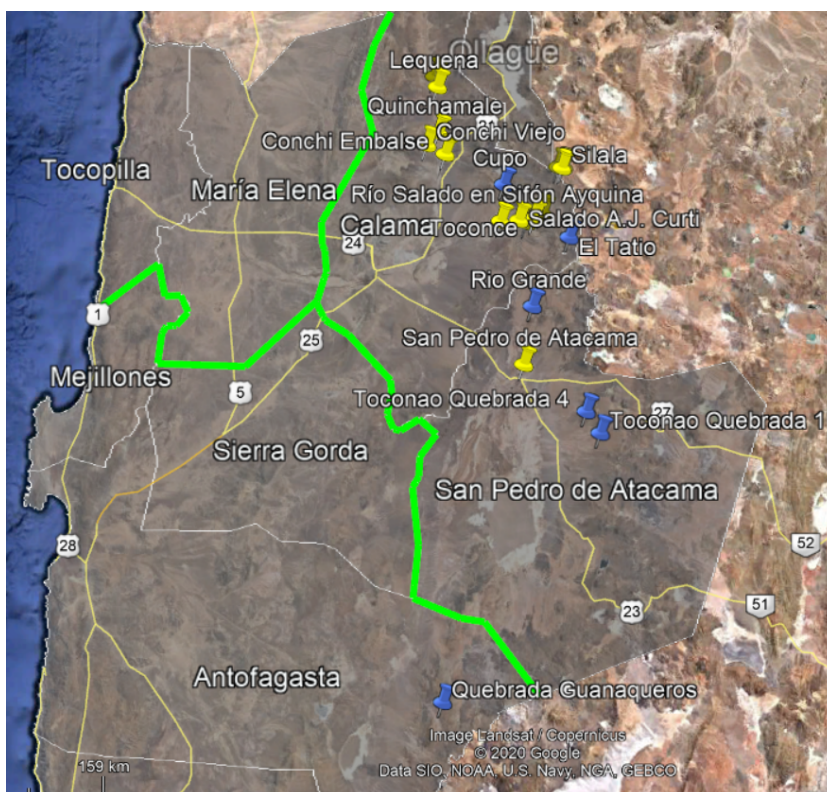


Figura A.3: Estaciones metereológicas seleccionadas para el análisis de precipitaciones en Antofagasta. En amarillo se muestran las estaciones cercas de un río principal, mientras que en azul las que tienen un caudal superior a 80 mm/año.



Figura A.4: Estaciones metereológicas ubicadas al noreste de El Loa. En amarillo se muestran las estaciones cercas de un río principal, mientras que en azul las que tienen un caudal superior a 80 mm/año.

Para organizar las fuentes de agua existentes, las cuencas hidrográficas sirven como guía de localización de cada río. En la Tabla A.1 se encuentran las cuencas hidrográficas de la región con la nomenclatura dada por la Dirección General de Aguas. En la Figura A.5 se encuentra la división geográfica entre cada cuenca [96] [97].

Tabla A.1: Cuencas hidrográficas de la Región de Antofagasta [30].

Cuenca	Nombre
020	Fronterizas entre Salar de Michincha y Río Loa
021	Río Loa
022	Costeras entre Río Loa y Quebrada Caracoles
023	Fronterizas entre Salares de Atacama y Socompa
024	Endorreicas entre Fronterizas y Salar de Atacama
025	Salar de Atacama
026	Endorreicas entre Salar de Atacama y Vertiente Pacífico
027	Quebrada Caracoles
028	Quebrada La Negra
029	Costeras entre Quebrada La Negra y Quebrada Pan de Azúcar.

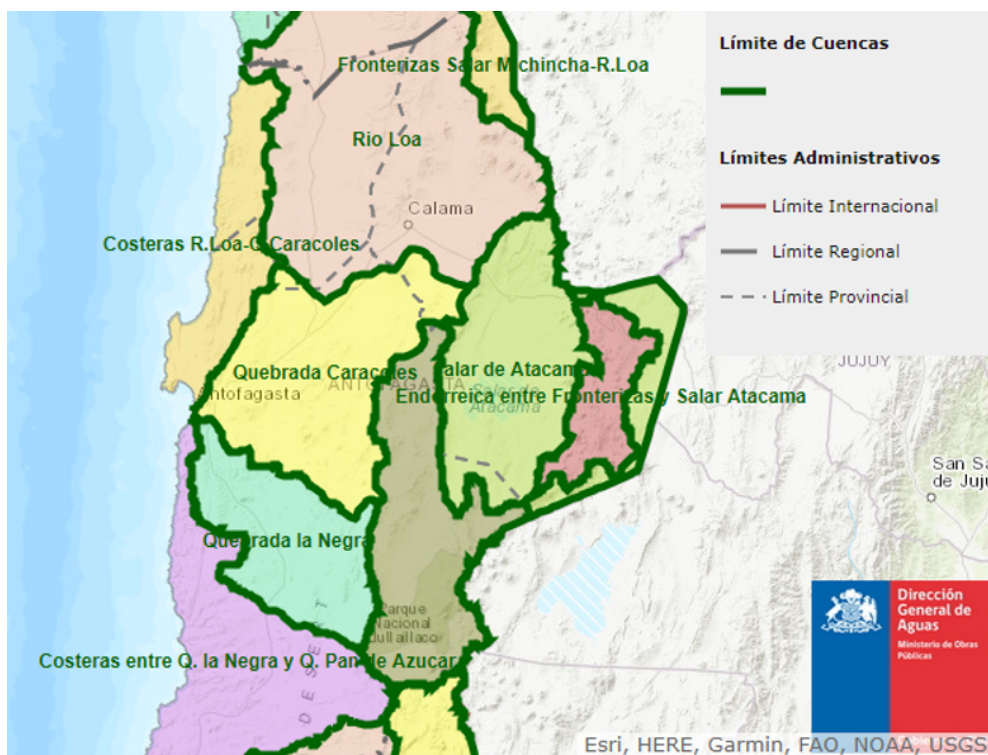


Figura A.5: Cuencas hidrográficas de Antofagasta [96] [97].

Anexo B

Caracterización hídrica y geográfica de Atacama

A continuación se presenta una serie de datos importantes para la configuración de algunos parámetros exclusivos de cada caso de estudio.

La región está dividida en 3 provincias, Chañaral, Copiapó y Vallenar, las cuales se observan en la Figura B.1.

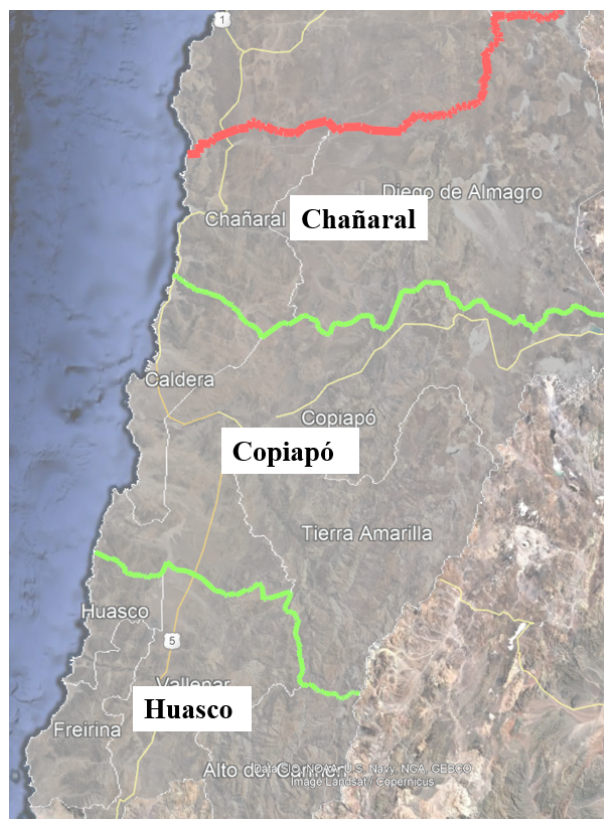


Figura B.1: Provincias en la región de Atacama. Elaboración propia en Google Earth ®.

Para analizar las precipitaciones, se estudiaron los datos históricos dados por las estaciones meteorológicas vigentes de la Dirección General de Aguas mostradas en la Figura B.2.

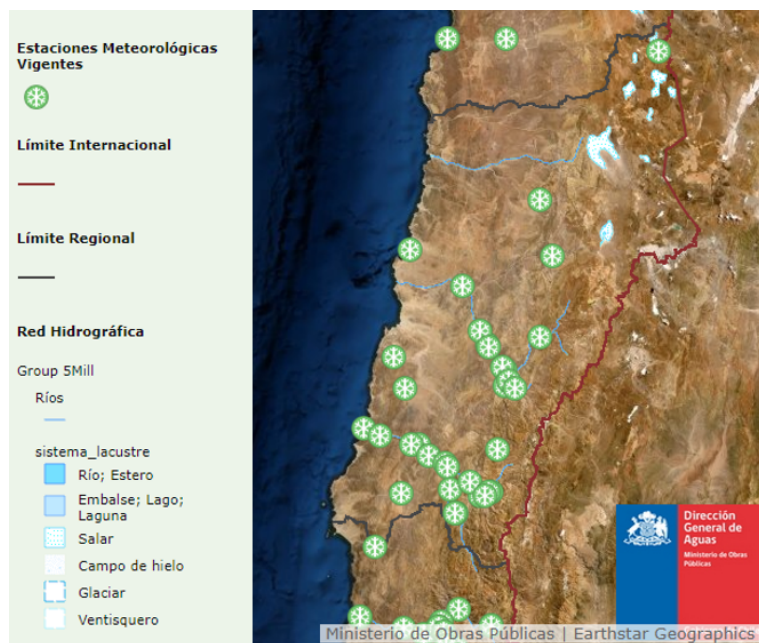


Figura B.2: Red hidrométrica de Atacama [95].

Los valores de precipitaciones mensuales por estación extraídos desde la Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea de la Dirección General de Aguas se pueden revisar en los siguientes link [31]:

- <https://bit.ly/3frZ1EG> para la provincia de Huasco.
- <https://bit.ly/3bdCdoN> para la provincia de Copiapó.
- <https://bit.ly/2WKq99m> para la provincia de Chañaral.

Estos datos sirven para establecer patrones de lluvias en distintos puntos de la región. Las estaciones climatológicas que se seleccionaron para el presente estudio son las que se encuentran relativamente cerca de los ríos principales o que poseen una medición promedio superior a 50 (mm/año). Estas estaciones se pueden observar en la Figura B.3



Figura B.3: Estaciones metereológicas seleccionadas para el análisis de precipitaciones en Atacama. En amarillo se muestran las estaciones cercas de un río principal, mientras que en azul las que tienen un caudal superior a 40 mm/año.

Para organizar las fuentes de agua existentes, las cuencas hidrográficas sirven como guía de localización de cada río. En la Tabla B.1 se encuentran las cuencas hidrográficas de la región con la nomenclatura dada por la Dirección General de Aguas. En la Figura B.4 se encuentra la división geográfica entre cada cuenca [39].

Tabla B.1: Cuencas hidrográficas de la Región de Atacama [39].

Cuenca	Nombre
030	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacífico
031	Costeras Quebraza Pan de Azúcar y Río Salado
032	Río Salado
033	Costera- Río salado- Río Copiapó
034	Río Copiapó
035	Costera- Copiapó- Totoral
036	Quebrada Totoral y Costera hasta Quebrada Carrizal
037	Quebrada Carrizal y Costeras hasta Río Huasco
038	Río Huasco
039	Costera- Huasco- Límite regional

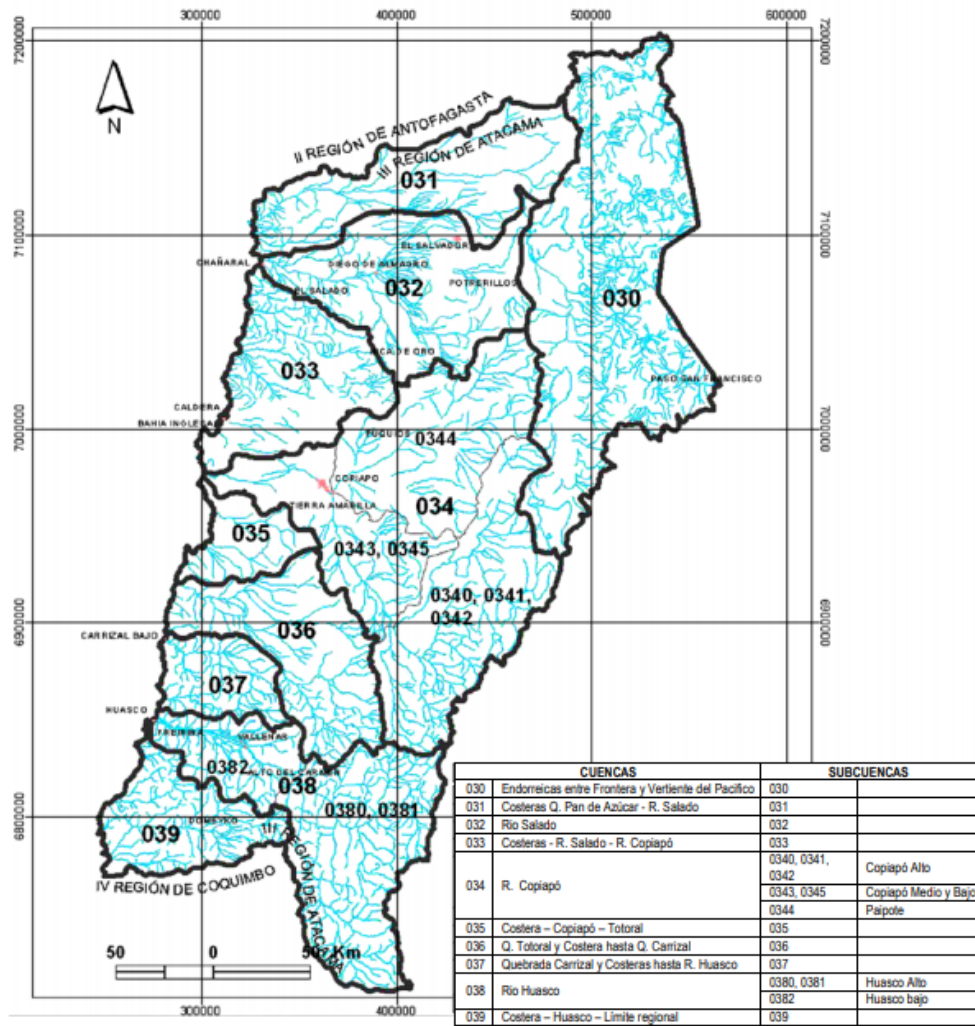


Figura B.4: Cuencas hidrográficas de Atacama [39].

Anexo C

Datos para los consumos de las distintas regiones

C.1. Datos para los consumos de la Región de Antofagasta

En la región de Antofagasta se establecen diversos consumos, que se estimaron de distinta forma. En bibliografía se hace una diferenciación para consumo de industrias, riego, mineras y plantas potabilizadoras para Antofagasta [30]. Si bien se podrían usar estos datos para establecer los consumos, en el estudio se indica que pueden tener varios errores de cálculo debido a las estimaciones hechas por la falta de datos. Así, los datos expuestos por el documento encontrado en referencia se utilizan sólo en el caso de ser necesario.

En la Tabla 9.3.1.1 del siguiente link: <https://bit.ly/36coZX6>, se puede observar el consumo industrial de la región de Antofagasta con datos dados por el Portal de Transparencia. Si bien del Portal de Transparencia se obtuvo una gran lista de las industrias, no era posible identificar todas las industrias en el mapa debido al tamaño de la información y a la complejidad de la tarea. Así, se decidió que se seleccionaría un consumo industrial grande de una empresa particular por provincia, para poner su ubicación en el mapa. Las otras industrias se agruparían en el centro de masa de cada provincia. Esto le quita realismo al modelo, pero permite la formulación del mismo y la reducción de los tiempos de cómputo, tal como se indica en la sección 3.3.2 del cuerpo de la memoria.

Según lo investigado, el consumo industrial debería ser de un total de 112,86 L/s (sin considerar minería), pero en referencia se indica un consumo de 212 L/s [30]. Hay dos posibilidades: la primera es que el consumo indicado en referencia es sólo de derechos otorgados, pero no necesariamente a derechos en uso, por lo que el cálculo puede estar sobre estimado. De hecho, este cálculo indica que las multas por no uso de derechos de agua aplican principalmente a minería y otras industrias; la segunda posibilidad es que los datos dados por el Portal de Transparencia sólo considera las empresas que descargan a fuente natural. Así, se decide utilizar los datos dados por el Portal de Transparencia, obteniéndose un consumo

total de 112,86 L/s distribuido en las distintas provincias, dejando fuera las industrias que no cumplen con el DS90. Los consumos obtenidos por el Portal de Transparencia se pueden observar en el siguiente link: <https://bit.ly/2Uh2yww>.

Según referencia, también se tiene un consumo de la minería de un total de 5.792 L/s [30]. Como se explicó en la sección 3.3.2 del cuerpo del informe, se dividió este consumo en el total de mineras para Antofagasta y luego se multiplicó por el número de empresas que componían un conglomerado geográfico para obtener el consumo de cada elemento. Estos valores se pueden observar en la Tabla 9.3.1.1 del siguiente link: <https://bit.ly/36coZX6>.

Para encontrar el consumo domiciliario de Antofagasta, se utilizó la población por comuna y poblado dentro de las distintas provincias. La población final por provincia se tiene en la Tabla C.1.

Tabla C.1: Población por comuna en la Región de Antofagasta según CENSO 2017 [98].

Provincia	Comuna	Habitantes
Antofagasta	Antofagasta	361.873
	Mejillones	13.467
	Sierra Gorda	10.186
	Taltal	13.317
El Loa	Calama	165.731
	Ollagüe	321
	San Pedro de Atacama	10.996
Tocopilla	Tocopilla	25.186
	María Elena	6.475

En la Tabla 9.3.2.1 del link: <https://bit.ly/36coZX6> se tiene el consumo domiciliario por provincia, obteniéndose un valor mayor al mostrado en referencia [30]. Esto se debe a que la información dada por referencia se estimó sólo en base a los caudales tratados por Aguas Antofagasta S.A., empresa que no abastece al total de la información.

Para el consumo agrícola se siguió el procedimiento que se explicó en la sección 3.3.2 del cuerpo de la memoria. Los resultados para la comuna de Antofagasta se tienen en la Tabla 9.3.3.1 del link: <https://bit.ly/36coZX6>.

C.2. Datos para los consumos de la Región de Atacama

En la región de Atacama se establecen diversos consumos, que se estimaron de distinta forma. En bibliografía se tiene el consumo de industrias, riego, mineras y plantas potabilizadoras para la región de Atacama [99]. Si bien se podrían usar estos datos para establecer los consumos, en el estudio se indica que pueden tener varios errores de cálculo debido a las estimaciones hechas por la falta de datos. Así, los datos expuestos por el documento encontrado en referencia se utilizan sólo en el caso de ser necesario

En la Tabla 8.2.1.2 del siguiente link: <https://bit.ly/36coZX6>, se puede observar el consumo

industrial de la región de Atacama con datos dados por el Portal de Transparencia. Si bien del Portal de Transparencia se obtuvo una gran lista de las industrias, no era posible identificar todas las industrias en el mapa debido al tamaño de la información y a la complejidad de la tarea. Así, se decidió que se seleccionaría un consumo industrial grande de una empresa particular por provincia, para poner su ubicación en el mapa. Las otras industrias se agruparían en el centro de masa de cada provincia. Esto le quita realismo al modelo, pero permite la formulación del mismo y la reducción de los tiempos de cómputo. En particular, para la provincia de Chañaral sólo se establece el consumo provincial, ya que el consumo de la empresa más grande de esa provincia, era muy pequeño comparado con las empresas de otros lugares, por lo que su omisión no tendría grandes efectos en el modelo.

Así, según lo investigado, el consumo industrial debería ser de un total de 58,16 L/s, pero en referencia [99] se indica un consumo de 518 L/s. Las diferencias entre las fuentes de información también se pueden deber a los mismo motivos que se mencionan para la sección de Antofagasta. Si bien en el estudio no indican cómo se estimó cada valor, también se tiene que 58,16 L/s es un valor mucho menor comparado con otras fuentes, ya que en otro estudio se encontró un consumo industrial para la región de 475,65 L/s, que es más cercano al valor dado por el Portal de Transparencia [100]. Así, el consumo industrial final es de 518 L/s. Los consumos obtenidos por el Portal de Transparencia se pueden observar en el siguiente link: <https://bit.ly/2Uh2yww>.

Según referencia, también se tiene un consumo de la minería de un total de 1.604 L/s [30]. Como se explicó en la sección 3.3.2, se dividió este consumo en el total de mineras para Atacama y luego se multiplicó por el número de empresas que componían un conglomerado geográfico según el Mapa Minero, para obtener el consumo de cada elemento. Estos valores se observan en la Tabla 9.3.1.2 del siguiente link: *link: <https://bit.ly/36coZX6>*

Para encontrar el consumo domiciliario de Atacama, se utilizó la población por comuna y poblado dentro de las provincias. La población final por provincia se tiene en la Tabla C.2

Tabla C.2: Población por comuna en la Región de Atacama según CENSO 2017 [101].

Provincia	Comuna	Habitantes
Copiapó	Copiapó	153.937
	Caldera	17.662
	Tierra Amarilla	14.019
Chañaral	Chañaral	12.219
	Diego de Almagro	13.925
Huasco	Vallenar	51.917
	Alto del Carmen	5.299
	Freirina	7.041
	Huasco	10.149

En la Tabla 9.3.2.2 del link: <https://bit.ly/36coZX6> se tiene el consumo domiciliario por provincia.

Para el consumo agrícola se siguió el procedimiento explicado en la sección 3.3.2 del cuerpo de la memoria. Los resultados para la comuna de Atacama se tienen en la Tabla 9.3.3.2 del link: <https://bit.ly/36coZX6>

Anexo D

Tecnologías de tratamiento de aguas

Algunas tecnologías que pueden usarse en el tratamiento de agua, específicamente en el reciclaje o tratamiento de agua desalinizada, se muestran a continuación:

D.1. Filtración por membrana

La filtración por membrana corresponde a un proceso de separación en el cual se eliminan o recuperan partículas debido a su tamaño o salinidad mediante membranas semipermeables y el uso de presión. Dependiendo de las características de la partícula se emplean distintos métodos de filtración, tal como se observa en la Figura D.1 [102].

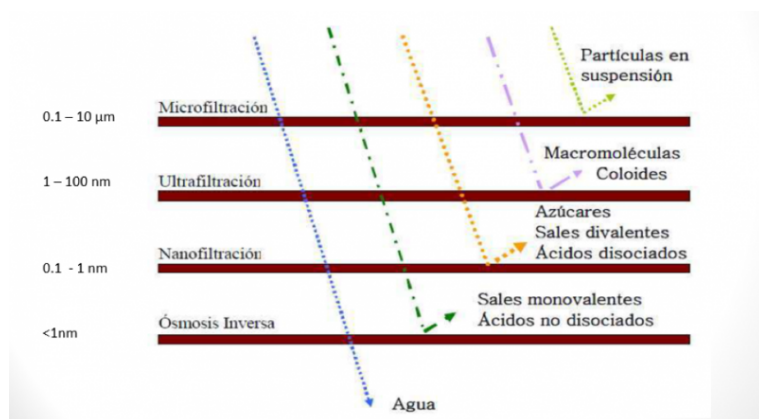


Figura D.1: Tamaño de partícula para distintos tipo de filtraciones [103].

- **Microfiltración:** Las membranas usadas en la microfiltración tienen un tamaño de poro de 10 a 0,05 μm , reteniendo partículas en suspensiones y emulsiones. La estructura de la membrana puede tener distintas geometrías, que influyen en el transporte de la materia a través de la pared. Las membranas también pueden ser de distintos materiales, existiendo diversos estudios de las características específicas de cada tipo de membrana. <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/filtracion-de-agua-por-membranas/>
- **Ultrafiltración:** Los poros empleados en la ultrafiltración son más pequeños. Las

membranas se componen de varias capas, donde la última capa presenta un diámetro de poros de entre los 2 y 50 nm. Además de esto, se diferencia de la microfiltración en que las especies a separar son compuestos macromoleculares o coloidales, propensos a tener interacciones fisicoquímicas con la membrana. Otra diferencia importante es que se debe emplear una presión más elevada para que ocurra la filtración. <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/filtracion-de-agua-por-membranas/>

- Nanofiltración: La nanofiltración es la secuencia lógica entre la ultrafiltración y la osmosis inversa y tiene un tamaño de poro inferior a los 2 nm, que hace que sus membranas tengan características particulares y más selectivas que en las filtraciones anteriormente mencionadas.
- Osmosis inversa: La osmosis invera es el proceso en el cual un flujo de solvente pasa a través de una membrana bajo la acción de un gradiente de concentración. En este proceso se debe superar la presión osmótica generada en el sistema para que ocurra la transferencia de solvente. Generalmente se aplica a la desalinización de agua, remoción de alcohol del vino, remoción de impurezas de aguas residuales, etc.

D.2. Bioreactor de membrana

Los bioreactores de membrana son definidos como sistemas en los que se incluye una degradación biológica de los contaminantes con un sistema de filtración de membrana. Dependiendo de su configuración, existen dos tipos principales de bioreactor [104]:

- Bioreactor con membrana integrada: Sistema en el cual la unidad de membrana encargada de la separación física, se encuentra dentro del tanque biológico. Para lograr el funcionamiento de la membrana, se presuriza el bioreactor o se crea presión negativa en el lado del permeado. En la Figura D.2 se observa un esquema para este tipo de bioreactores.

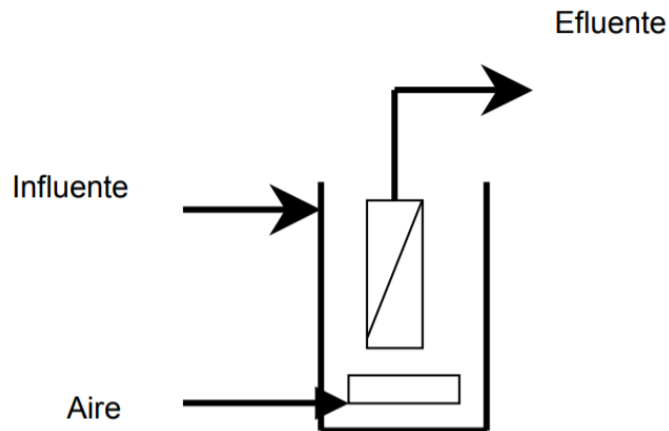


Figura D.2: Esquema de bioreactor con membrana integrada [104].

- Bioreactor con membrana externa: Sistema en el cual la membrana se encuentra separada del bioreactor y donde el licor de la mezcla se recircula hasta el bioreactor. En la Figura D.3 se observa un esquema para este tipo de bioreactores.

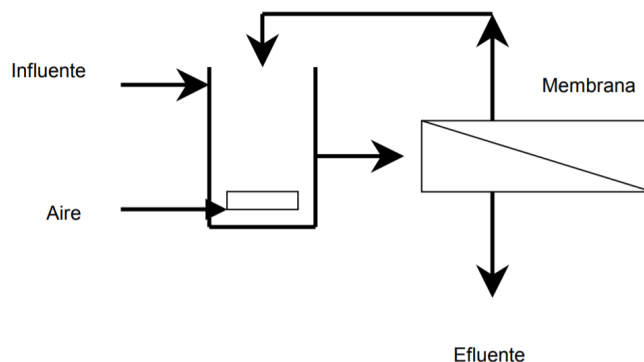


Figura D.3: Esquema de bioreactor con membrana externa [104].

Este tipo de reactores requiere un control del proceso estricto, para mantener una serie de parámetros en orden, tales como la carga másica, la DQO, la DBO_5 , entre otros [104]. En la presente memoria no se ahondará en este tipo de reactores.

D.3. GAC

La adsorción sobre carbón activado es un método de tratamiento avanzado de agua residual. Generalmente se utiliza un filtro de medio de carbón activado granular que, gracias a sus propiedades, elimina compuestos orgánicos refractorios, compuestos nitrogenados, sulfuros, entre otros. El rendimiento de este sistema depende de condiciones de pH, temperatura, caudal, y limpieza y regeneración adecuada del carbón activado [105].

D.4. Intercambio iónico

El intercambio iónico es una operación que permite la separación de sustancias iónicas disueltas mediante el intercambio con otros iones presentes en un material intercambiador sólido. Cuando se utilice el material, debe ser sometido a un proceso de regeneración para poder ser nuevamente utilizado. Para el tratamiento de aguas, los objetivos de utilizar un intercambiador iónico pueden ser: ablandamiento de aguas, desmineralización, eliminación de alcalinidad, cationes de metales pesados, aniones de ácidos fuertes, entre otros [106]. El proceso de intercambio iónico puede ser continuo o batch, y depende de los requerimientos de cada empresa. En la Figura D.4 se puede observar un diagrama simplificado de un intercambio iónico mediante resinas [106].

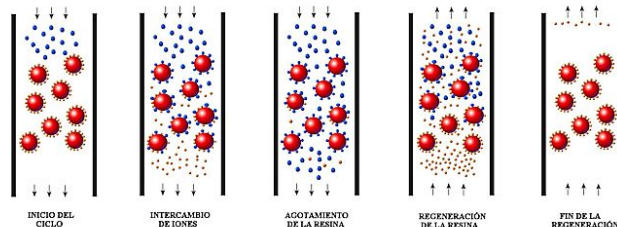


Figura D.4: Esquema de un intercambio iónico [106].

Anexo E

Cálculo de costo de instalación de cañerías - RedCapC

Se tiene que el valor de colocación y pruebas de la cañería de 0,017 UF/kg, para una tubería de polietileno de alta densidad PE 100 PN 10 de 1 metro de diámetro [79].

Para estimar la cantidad de kg que se utilizarán, se usa la densidad de 960 kg/m^3 , por lo que el valor de instalación de cañería por metro de largo [107]:

$$Instalacion_{cañería} = 0,017 \left[\frac{UF}{kg} \right] \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot A[m^2]$$

En la ecuación anterior, A corresponde al área de la cañería y ρ a la densidad del material. Considerando un espesor aproximado de 60 [mm], el área de la cañería quedaría como sigue [79]:

$$A[m^2] = \pi \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2) = \pi \cdot (R_{ext}^2 - (R_{ext} - espesor)^2) = \pi \cdot (0,5^2 - 0,44^2) = 0,177[m^2]$$

Reemplazando el área de la cañería en la ecuación de costo de intalación:

$$Instalacion_{cañería} = 0,017 \left[\frac{UF}{kg} \right] \cdot 960 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 0,177[m^2] = 2,89 \left[\frac{UF}{m} \right]$$

Además, también se debe considerar la instalación de cañerías donde, para la misma tubería anterior, se tiene un costo de 10,406 UF/m, por lo que el costo total por instalación de cañería es [79]:

$$Instalación \text{ total cañería} = Ins_{can} = 13,3[UF/m] \quad (E.1)$$

Se creó el parámetro Ins_{can} para denotar el costo total para la instalación de las cañerías por metro lineal.

Finalmente, se asume que el largo de instalación de las cañerías será igual a la distancia entre los nodos que conecte la misma, sin embargo, se asume que ya existe capacidad en

las cañerías existentes, por lo que no deben instalarse todas las cañerías. Este supuesto se explica en el cuerpo de la memoria en la sección 4.5.5. Por otro lado, se debe hacer el cambio de UF a USD (valores del 01 mayo de 2020). Luego, para anualizar la ecuación anterior, se divide por la vida útil de las cañerías (50 años) [108], obteniéndose la ecuación E.2, donde DN_i corresponde a nodos de destino de i y ON_i corresponde a nodos de origen de i [108]:

$$\text{RedCapC} \left[\frac{USD}{\tilde{\text{año}}} \right] = 9,13 \cdot \text{dist}_{prom,(i,j)}[m] \cdot E_i \forall i: \text{nueva planta de tratamiento}, \forall j \in DN_i \cup ON_i \quad (\text{E.2})$$

Anexo F

Costo de instalación de plantas - PlantCapC

Dentro de esta categoría se incluye el costo de instalación de nuevas PTAS con calidad potable para hacer reciclaje en la red. Además, se incluye la modificación de las PTAS actuales y el tratamiento de agua de lluvia y agua de mar para las nuevas PTAP. El cálculo general costo de instalación viene dado por la ecuación:

$$PlantCapC = K_f \cdot \left(\sum_i Cvr_i \cdot \sum_j F_{j \rightarrow i} + E_i \cdot (Cfr_i + Ter_i) \right) \quad (F.1)$$

En la ecuación anterior, K_f es el factor de anualización de las plantas, que puede aproximarse a $1/(\text{Vida útil de planta (años)})$ [21], Cvr_i es el costo variable y Cfr_i es la intersección con la ordenada, E_i corresponde a la existencia de la planta y Ter_i es el terreno donde se instala la planta. Con respecto a esto último, este valor no siempre va a existir debido a que en las plantas modificadas, se asume que el terreno ya está siendo usado con fines de tratamiento de agua, por lo que no es necesario adquirir otro terreno.

En el presente Anexo se denominará CI al costo dado por el costo variable y a la intersección con la ordenada de la forma:

$$CI_i(MUSD) = Cvr_i \cdot Q_i(m^3/s) + Cfr_i \quad (F.2)$$

En la ecuación anterior, Q_i corresponde al caudal de tratamiento de la planta i , y es análogo al flujo de tratamiento.

F.1. Cálculo de costo de instalación de nuevas plantas de reciclaje

Se buscó en bibliografía planteada por [14] y en otras referencias para encontrar el costo de instalación de las distintas tecnologías. Se muestra en la Tabla F.1 el resumen de las

ecuaciones para cada operación del tratamiento de aguas residuales con calidad potable. Además a las ecuaciones originales se le hicieron algunas modificaciones para actualizar el valor del costo al año 2020 mediante la ecuación F.3, donde los valores CEPCI se muestran en la Tabla F.2. Sumado a esto, se le hicieron modificaciones en para dejar todas las ecuaciones con las mismas unidades de medición y para linealizar las ecuaciones.

Tabla F.1: Resumen de costos de instalación de distintas tecnologías necesarias para el reciclaje de agua. MUSD se refiere a millones de dólares.

Tecnología	Ecuación	Cvr_i	Cfr_i
Tratamiento primario	$CI[MUSD] = 5,20 \cdot Q[m^3/s] + 11,87$	5,20	11,87
Lodos activados	$CI[MUSD] = 40,25 \cdot Q[m^3/s] - 9,44$	70,25	-9,44
Microfiltración	$CI[MUSD] = 43,12 \cdot Q[m^3/s] + 43,41$	43,12	43,41
Osmosis inversa	$CI[MUSD] = 10,38 \cdot Q[m^3/s] + 13,33$	10,38	13,33
Cloración	$CI[MUSD] = 0,802 \cdot Q[m^3/s] + 0,36$	0,80	0,36
Intercambio iónico	$CI[MUSD] = 4,04 \cdot Q[m^3/s] + 6,31$	4,04	+6,31

$$P_{tdiseo} = P_{tref} \cdot \left(\frac{CEPCI_{t_{diseo}}}{CEPCI_{t_{ref}}} \right) = P_{tref} \cdot factor_{CEPCI} \quad (F.3)$$

Tabla F.2: Valores de CEPCI obtenidos de bibliografía [109]. Los años marcados con asterisco son predicciones obtenidas desde referencia [110]. P es el precio y t el año de la cotización.

Año	Valor CEPCI	Factor CEPCI al año 2020
1999	390,6	0,58
2008	575,4	0,86
2009	521,9	0,78
2010	550,8	0,82
2011	585,7	0,88
2012	584,6	0,88
2013	567,3	0,85
2014	576,1	0,86
2015	556,8	0,83
2016	541,7	0,81
2017	567,5	0,85
2018	603,1	0,90
2019*	652,9	0,98
2020*	668,0	1,00

La ecuación final para el costo de instalación de plantas de reciclaje, sin considerar el factor de anualización y el costo del terreno, es el siguiente:

$$CI_{PTASRN}(MUSD) = 103,79 \cdot Q(m^3/s) + 65,84 \quad (F.4)$$

El cálculo de cada tecnología se muestra a continuación.

Costo de instalación para tratamiento primario

Para encontrar la ecuación de instalación de la tecnología de tratamiento primario se partió desde la ecuación F.5 [111]

$$CI(MUSD) = 15,75 \cdot Q(m^3/s)^{0,684} \quad (F.5)$$

En la ecuación anterior, CI corresponde a costo de instalación en millones de dólares y Q corresponde al caudal de tratamiento en m^3/s . Este tratamiento primario incluye pretratamiento, coagulación-floculación y decantación.

La investigación se realizó el año 2015, por lo que se actualiza el precio con un $factor_{CEPCI}$ de 0,83 obteniendo la ecuación $CI = 13,3 \cdot Q^{0,684}$. Finalmente se linealiza la ecuación anterior con Excel obteniendo un coeficiente de correlación de 0,9889.

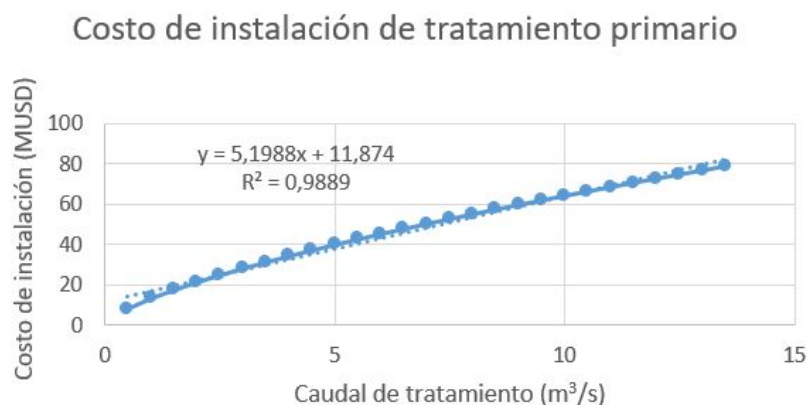


Figura F.1: Linealización del costo de instalación de tratamiento primario. Elaboración propia en base a referencia [111].

Así, el costo de instalación para el tratamiento primario viene dado por la ecuación F.6

$$CI(MUSD) = 5,1988 \cdot Q(m^3/s) + 11,874 \quad (F.6)$$

Cálculo de costo de instalación de lodo activado

Para encontrar la ecuación de instalación de la tecnología de lodos activados se partió desde la ecuación F.7 encontrada en bibliografía [112].

$$\log(CI) = 0,256 \cdot (\log(Q))^{1,556} + 4,545 \quad (F.7)$$

En la ecuación anterior, CI, correspondiente al costo de instalación, está en dólares y Q en $m^3/día$.

Luego, se actualiza la ecuación para obtener un caudal en m^3/s y un costo de instalación en millones de dólares, por lo que se observan los valores actualizados en la ecuación F.8

$$CI = \frac{1}{1.000.000} \cdot 10^{0,256 \cdot (\log(Q(m^3/s) \cdot 24(h/d) \cdot 3600(s/h)))^{1,556} + 4,545} \quad (F.8)$$

Así, se linealizó la ecuación anterior con Excel obteniendo un coeficiente de correlación de 0,9994 mostrado en la Figura F.2.

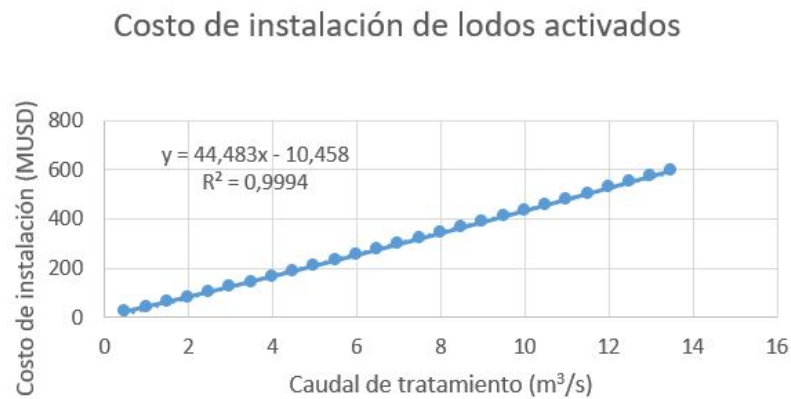


Figura F.2: Linealización del costo de instalación de lodos activados. Elaboración propia en base a referencia [112].

Luego, actualizando el año al 2020 mediante el factor CEPCI con año de referencia 2014, se obtiene la ecuación F.9.

$$CI(MUSD) = 40,25 \cdot Q(m^3/s) - 9,44 \quad (F.9)$$

Cálculo de costo de instalación de microfiltración

Para encontrar la ecuación de instalación de la tecnología de microfiltración se partió desde la ecuación F.10 [113].

$$CI(MUSD) = 7,1052 \cdot Q(MGPD)^{0,8302} \quad (F.10)$$

En la ecuación anterior, CI se encuentra en MUSD y Q en MGPD (Millones de galones por día). Así, para linealizarlo primero se cambió el caudal a m^3/s , obteniendo el gráfico mostrado por la Figura F.3 y la ecuación F.12 con un coeficiente de correlación de 0,997.

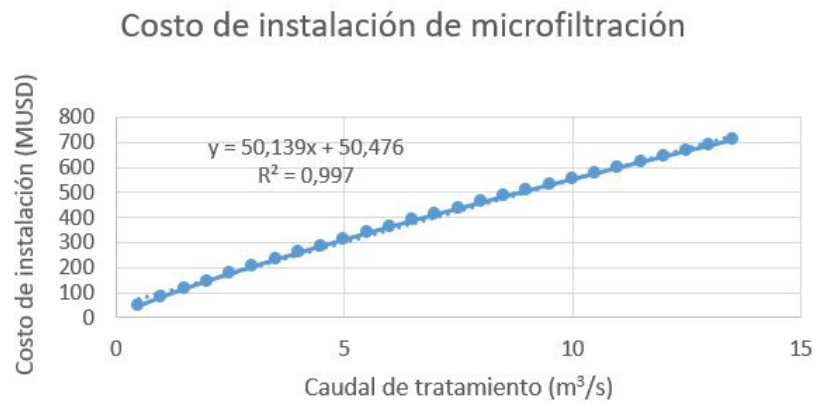


Figura F.3: Linealización del costo de instalación de microfiltración. Elaboración propia en base a referencia [113].

$$CI(MUSD) = 50,139 \cdot Q(m^3/s) + 50,476 \quad (F.11)$$

Con CI en MUSD y Q en m^3/s Finalmente, se actualiza el valor al año actual mediante el factor CEPCI correspondiente al año 2008, generándose la ecuación

$$CI(MUSD) = 43,12 \cdot Q(m^3/s) + 43,41 \quad (F.12)$$

Cálculo de costo de instalación de cloración

Para encontrar la ecuación de instalación de la tecnología de cloración se utilizaron los datos de costos de capital para distintos flujos de tratamiento utilizando una concentración promedio de cloro de 10 mg/L [114]. Estos datos se graficaron según la Figura F.4 para crear la ecuación F.13.

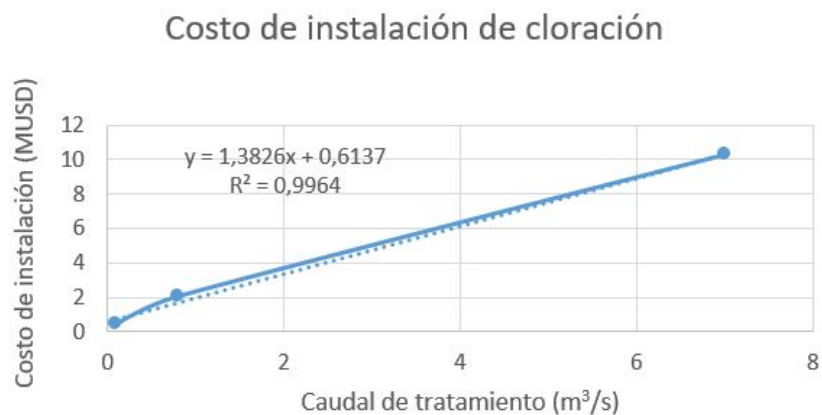


Figura F.4: Linealización del costo de instalación de cloración. Elaboración propia en base a referencia [114].

$$CI(MUSD) = 1,3826 \cdot Q(m^3/s) + 0,6137 \quad (F.13)$$

En la ecuación anterior, CI, correspondiente al costo de instalación, está en millones dólares y Q, correspondiente al caudal de tratamiento, en m^3/s .

Finalmente se actualiza al año 2020 mediante el factor CEPCI con año de referencia 1999, generando la ecuación F.14

$$CI(MUSD) = 0,802 \cdot Q(m^3/s) + 0,356 \quad (F.14)$$

Cálculo de costo de instalación de osmosis inversa

Para encontrar la ecuación de instalación de la tecnología de osmosis inversa se partió desde la ecuación F.15 [113].

$$\log(CI) = 0,966 \cdot (\log(Q))^{0,929} + 3,082 \quad (F.15)$$

En la ecuación anterior, CI, correspondiente al costo de instalación, está en dólares y Q en $m^3/\text{día}$.

Luego, se actualiza la ecuación para obtener un caudal en m^3/s y un costo de instalación en millones de dólares, por lo que se observan los valores actualizados en la ecuación F.16

$$CI = \frac{1}{1.000.000} \cdot 10^{0,966 \cdot (\log(Q(m^3/s) \cdot 24(h/d) \cdot 3600(s/h)))^{0,929} + 3,082} \quad (F.16)$$

Así, se linealizó la ecuación anterior con Excel obteniendo un coeficiente de correlación de 0,9935 mostrado en la Figura F.5.

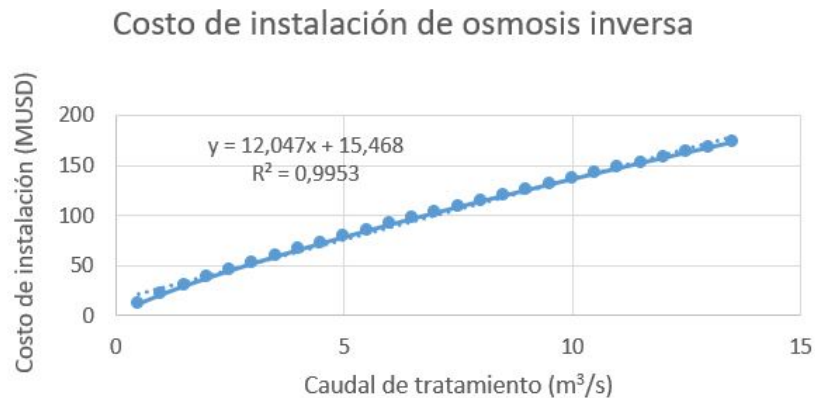


Figura F.5: Linealización del costo de instalación de osmosis inversa. Elaboración propia en base a referencia [113].

Luego, actualizando al año 2020 mediante el factor CEPCI con año de referencia 2014, se obtiene la ecuación F.17

$$CI(MUSD) = 10,38 \cdot Q(m^3/s) + 13,33 \quad (F.17)$$

Cálculo de costo de instalación de intercambio iónico

Para encontrar la ecuación de instalación de la tecnología de intercambio iónico se partió desde los datos presentes en bibliografía [14]. Estos datos se graficaron según la Figura F.6 y se linealizaron generando un coeficiente de correlación de 0,9938.

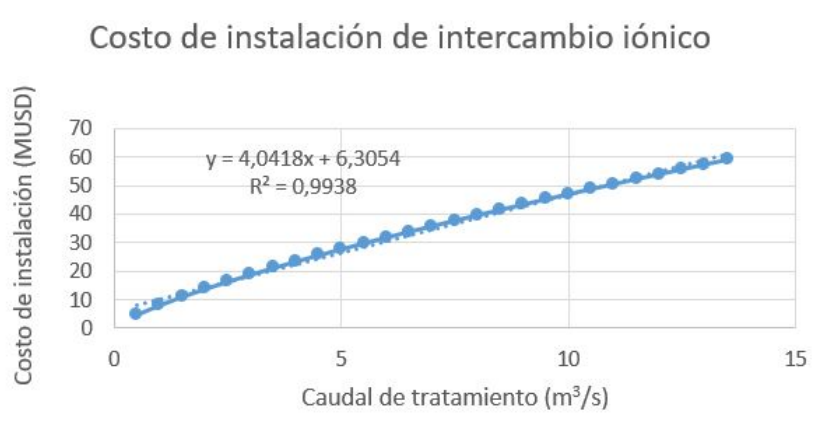


Figura F.6: Linealización del costo de instalación de intercambio iónico. Elaboración propia en base a referencia [14].

Así, se obtiene la ecuación F.18 para el costo de instalación de intercambio iónico.

$$CI(MUSD) = 4,04 \cdot Q(m^3/s) + 6,31 \quad (F.18)$$

En la ecuación anterior, CI, correspondiente al costo de instalación, está en MUSD y Q en m^3/s .

F.2. Cálculo de costo de instalación de plantas de reciclaje modificadas

Las PTAS modificadas son plantas existentes a las cuales se le agregan tecnologías para mejorar su calidad de salida. Así, una planta existente sólo tiene el tratamiento primario, tratamiento secundario y desinfección básica con cloro. En consecuencia, sólo se deben agregar las tecnologías faltantes: microfiltración, osmosis inversa e intercambio iónico. Los costos se asumen iguales a los del Anexo F.1. Así, el costo de instalación de plantas de reciclaje

modificadas, sin considerar factor de anualización, es el siguiente:

$$CI_{PTASRM}[MUSD] = 57,54 \cdot Q \left(\frac{m^3}{s} \right) + 63,05 \quad (F.19)$$

F.3. Cálculo de costo de instalación de plantas de desalinización

Para calcular el costo de instalación de una planta de desalinización se buscó bibliográficamente el costo de instalación en función de cada planta. En la tabla F.3 se muestran la fuentes revisadas

Tabla F.3: Tabla costos instalación desalinizadora

Nombre proyecto	Costo instalación (MUSD)	Costo de instalación (MUSD /año)	Caudal de tratamiento (m^3/s)	Vida útil (años)	Ref.
Desalación de agua de mar mediante sistema Osmosis Inversa y Energía Fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, Región de Coquimbo	0,3	0,015	$7 \cdot 10^{-5}$	20	[115]
Planta desalinizadora Tal tal	0,4	0,02	$1,5 \cdot 10^{-2}$	20	[116]
Planta de Tratamiento de Agua Potable de Osmosis Inversa Planta Nantoco, Comuna de Tierra Amarilla, Aguas Chañar S.A.	8	0,32	$8,5 \cdot 10^{-2}$	25	[117]
Desalinizadora Tocopilla	26	1,3	0,13	20	[116]
Estimación de costos a costos de inversión y costo por metro cúbico de agua tratada en desalación por OI	29	1,5	0,2	20	[116]
Desalinizadora Arica	30	1,5	0,2	20	[116]
Estimación de costos a costos de inversión y costo por metro cúbico de agua tratada en desalación por OI	46	2,3	0,4	20	[116]
Planta Desalinizadora de Antofagasta, II Región	90	3	1	30	[118]
Planta Desalinizadora de Antofagasta, II Región	126	4,2	1,4	30	[118]

Los datos obtenidos se grafican para obtener la ecuación de costos. Los resultados se observan en las Figuras F.7 y F.8, donde se tiene una línea de tendencia lineal y polinómica de grado 2, respectivamente.

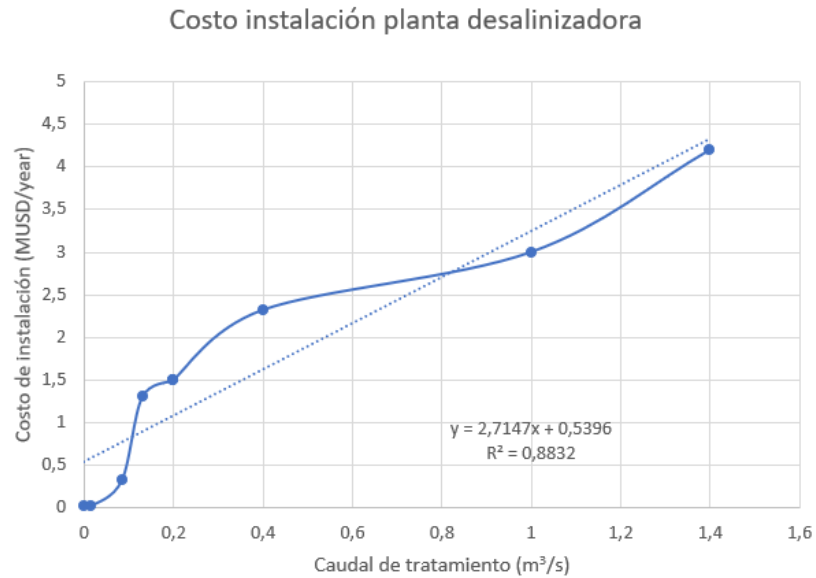


Figura F.7: Linealización del costo de instalación planta desalinizadora. Elaboración propia.

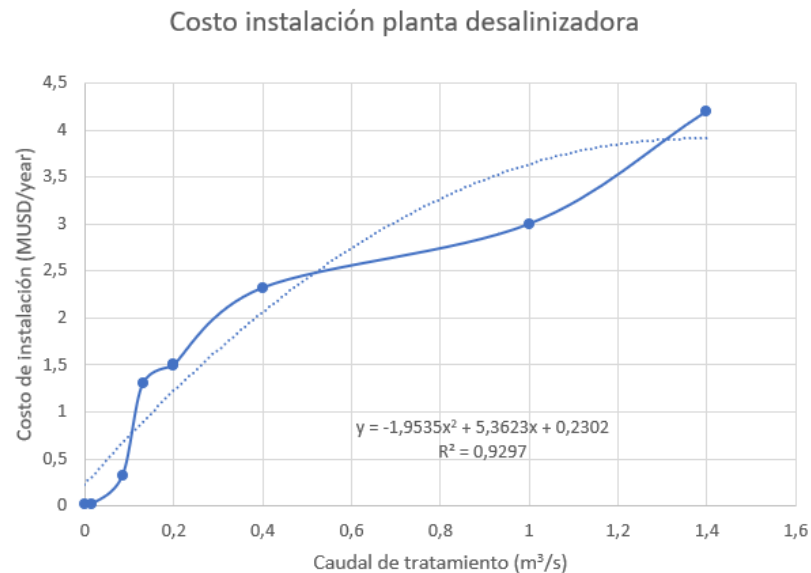


Figura F.8: v Elaboración propia.

Así, el costo de instalación para plantas desalinizadoras puede ser lineal o no lineal. Para efectos de reducir el costo computacional del programa, se selecciona el costo lineal sin incluir el efecto de economía de escalas y sin costo de terreno:

$$CI_{\text{desalinizadora}} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 2,71 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 0,54 \quad (F.20)$$

La mayoría de las plantas encontradas en bibliografía no hacen una etapa de

remineralización como tal, si no que realizan una mezcla con agua cruda, disminuyendo los costos de instalación de la etapa extra y de insumos. Así la ecuación F.21 se multiplica por un factor de 1,2 para asimilar el costo extra de instalar la etapa de carbonatación, generando la ecuación

$$CI_{\text{desalinizadora}} \left[\frac{MUSD}{\text{año}} \right] = 3,25 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right] + 0,65 \quad (F.21)$$

F.4. Cálculo de costo de instalación de plantas de potabilización convencional

Según referencia, una planta de potabilización convencional, es una planta de filtración estándar [14]. Así, esta planta tiene una ecuación inicial para costo de capital de [113]:

$$CI(MUSD) = 8,7684 \cdot Q(MGPD)^{0.5957} \quad (F.22)$$

En la ecuación anterior, CI es el costo de instalación en millones de dólares y Q al caudal de tratamiento en millones de galones por día. La investigación se realizó el año 2008 por lo que con el factor CEPCI queda:

$$CI(MUSD) = 7.541 \cdot Q(MGPD)^{0.5957} \quad (F.23)$$

Luego, se traspassa el caudal a m^3/s y se grafica, obteniéndose la Figura F.9 donde se observa el coeficiente de correlación de 0,981.

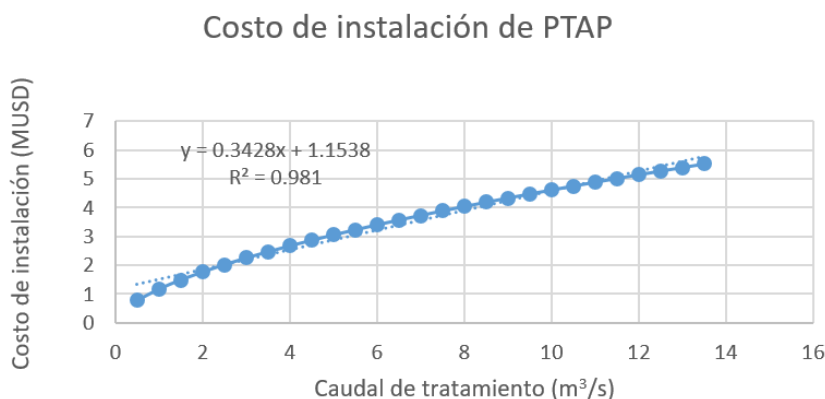


Figura F.9: Costo de instalación planta de tratamiento de agua potable convencional. Elaboración propia en base a referencia [113].

Finalmente, en la ecuación F.24 se muestra el costo de instalación de una PTAP convencional, sin factor de anualización ni costo de terreno:

$$CI_{PTAP}(MUSD) = 0,3428 \cdot Q \left(\frac{m^3}{s} \right) + 1,15 \quad (F.24)$$

F.5. Cálculo de costo de terreno

La metodología para calcular el costo del terreno fue la siguiente:

1. Fijar las superficies de construcción de cada planta.
2. Buscar el costo por metro cuadrado en un terreno industrial que se encuentre ubicado en cada provincia de los casos de estudio.
3. Multiplicar las superficie por el costo y obtener el valor del terreno

Para el primer paso, se tiene que el tamaño de la planta es proporcional a su caudal de tratamiento, sin embargo, para simplificar el cálculo, se fijan 4 valores correspondientes a 3 tipos de plantas: Plantas de tratamiento de agua potable convencionales, plantas de tratamiento de agua residual y plantas de desalinización.

Las plantas de tratamiento de agua servida con las que ocupan mayor tamaño debido a la presencia de tratamiento biológico. Para tener una referencia, la planta La Farfana, en Maipú, Santiago, tiene un terreno completo de 60 hectáreas, para un caudal máximo de $15[m^3/s]$ referencia <http://biblioteca.cchc.cl/datafiles/21155.pdf> . Así, se decide fijar un terreno de 40 hectáreas para plantas de tratamiento de aguas servidas, ya que el caudal de tratamiento de las plantas actuales no supera ese caudal. Con este límite, se fijan también el tamaño del terreno de las siguientes plantas, decidiéndose un terreno de 25 hectáreas para plantas desalinizadoras y 15 hectáreas para plantas de tratamiento de agua potable convencionales. Estos supuestos tienen una incidencia lineal en los resultados de costos, pudiendo aumentar o disminuir en la realidad.

Luego, para el segundo y tercer paso, se seleccionan los terrenos en los distintos distritos, obteniéndose la Tabla F.4 para la región de Antofagasta y la Tabla F.5 para la región de Atacama. Se destaca que los costos son actualizados a la fecha de Abril de 2020, pudiendo cambiar su valor con el tiempo. ver referencias

Tabla F.4: Costos de terreno para la región de Antofagasta

Planta	Tamaño	Tocopilla		El Loa		Antofagasta	
		Precio [USD/ m^2]	Precio final [USD]	Precio [USD/ m^2]	Precio final [USD]	Precio [USD/ m^2]	Precio final [USD]
NP1 y NP3	15 [ha]	73,59	11.038.500	50,17	7.525.500	97,00	14.550.000
NP2	25 [ha]	73,59	18.397.500	50,17	12.542.500	97,00	24.250.000
NW	40 [ha]	73,59	29.436.000	50,17	20.068.000	97,00	38.800.000

Tabla F.5: Costos de terreno para la región de Atacama

Planta	Tamaño	Chañaral		Copiapó		Huasco	
		Precio [USD/ m^2]	Precio final [USD]	Precio [USD/ m^2]	Precio final [USD]	Precio [USD/ m^2]	Precio final [USD]
NP1 y NP3	15 [ha]	100,35	15.052.500	46,83	7.024.500	73,59	11.038.500
NP2	25 [ha]	100,35	25.087.500	46,83	11.707.500	73,59	18.397.500
NW	40 [ha]	100,35	40.140.000	46,83	18.732.000	73,59	29.436.000

Los valores anteriores también se multiplican por el costo de anualización, por lo que el valor está sobredimensionado, ya que el terreno usualmente aumenta el valor con los años, y no se considera la venta final, si es que se pone fin al proyecto.

Los valores finales de costo de terreno se observan en la Tabla F.6.

Tabla F.6: Parámetros finales para costos de terreno

Planta	Región Antofagasta			Región Atacama		
	Terreno Tocopilla [USD/año]	Terreno El Loa [USD/año]	Terreno Antofagasta [USD/año]	Terreno Chañaral [USD/año]	Terreno Copiapó [USD/año]	Terreno Huasco [USD/año]
NP1 y NP3	551.925	376.275	727.500	752.625	351.225	551.925
NP2	919.875	627.125	1.212.500	1.254.375	585.375	919.875
NW	1.471.800	1.003.400	1.940.000	2.007.000	936.600	1.471.800

Anexo G

Costo de operación de la red -RedOpC

El costo dado por la ecuación de Bernoulli es el siguiente:

$$RedOpC = T \cdot E \cdot \sum_{j \in DN_i} \sum_i F_{i,j} \cdot \left(g \cdot (h_j - h_i) + f \cdot \frac{dist_{(i,j)} \cdot v^2}{2D} \right), \forall i \in U \quad (G.1)$$

En la ecuación G.1, T es el tiempo anual de operación, E el costo por unidad de electricidad, g la aceleración gravitacional, h_i la altura del nodo i y h_j la altura del nodo j , $dist_{(i,j)}$ la distancia entre el nodo i y el nodo j , v es la velocidad lineal, f el factor de Darcy y D el diámetro de la cañería.

El flujo anterior debiese estar como flujo másico, por lo que el flujo volumétrico se multiplica por la densidad. Por otro lado, para encontrar el costo por unidad de electricidad se busca en referencia del sistema interconectado central para obtener un promedio, obteniéndose un valor base por consumo de 86,957 [CLP/kWh] [119]. Se realiza la conversión a dólar americano para tener los valores estandarizados:

$$E = 86,957[CLP/kWh] \cdot 0,0012[USD/CLP] = 0,104[USD/kWh]$$

Para el tiempo anual de operación, se asume que la planta opera 24 horas al día, los 7 días a la semana, por lo que el parámetro queda de la siguiente forma:

$$T = 24[h/day] \cdot 365[day/año] = 8760[h/año]$$

Haciendo un análisis de unidades se tiene lo siguiente:

$$[RedOpC] = \left[\frac{h}{año} \right] \cdot \left[\frac{USD}{kW \cdot h} \right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{kW \cdot s^3}{kg \cdot m^2} \right] \cdot \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot \left[\frac{m^2}{s^2} \right] \cdot 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{USD}{año} \right]$$

Por otro lado, la ecuación G.1 tiene términos no lineales debido a que, si se fija la velocidad, el diámetro quedará en función del flujo y la velocidad.

Así, para disminuir el costo computacional se decide linealizar la función en Excel, dejando el diámetro fijo. Luego, la ecuación G.1 se separa en dos términos de la forma:

$$RedOpC = T \cdot E \cdot \sum_{j \in DN_i} \sum_i \left((F_{i,j} \cdot g \cdot (h_j - h_i)) + \left(F_{i,j} \cdot \frac{f \cdot dist_{(i,j)} \cdot v^2}{2D} \right) \right)$$

Se puede separar el término de la derecha de la ecuación en dos partes:

$$Termino_1 = T1 = (F_{i,j} \cdot g \cdot (h_j - h_i))$$

$$Termino_2 = T2 = \left(F_{i,j} \cdot \frac{f \cdot dist_{(i,j)} \cdot v^2}{2D} \right)$$

El primer término es lineal, pero el segundo es el que se linealiza. Para este último, la velocidad queda en función del diámetro y el flujo:

$$F[m^3/s] = v[m/s] \cdot Area[m^2] = v \cdot \pi \cdot r^2 = v \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \rightarrow v = \frac{F \cdot 4}{\pi \cdot D^2}$$

Luego, al reemplazar la ecuación anterior en el término 2 se tiene:

$$T2 = dist_{(i,j)} \cdot \frac{(F_{i,j})^3 \cdot f \cdot 8}{\pi \cdot D^5}$$

Luego, el valor que se linealiza en excel es T2 sin el factor de distancia, utilizando un diámetro promedio de 1 [m], obteniéndose el gráfico de la Figura G.1.

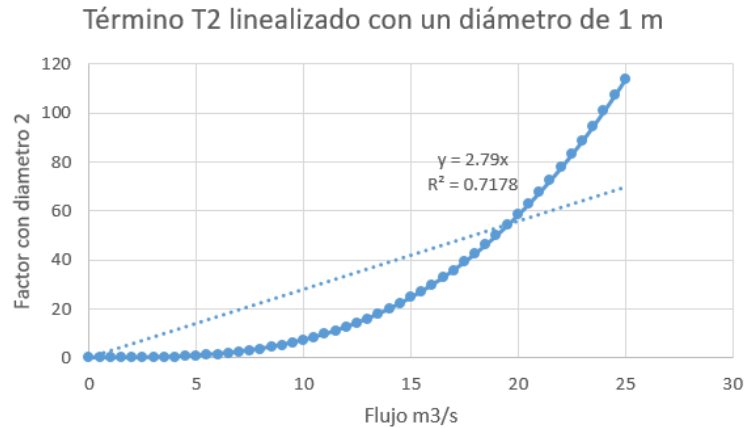


Figura G.1: Gráfico para linealización del término 2 del costo operacional de redes. Elaboración propia.

Así, el costo operacional linealizado queda:

$$RedOpC = T \cdot E \cdot F_{i,j} \cdot \sum_{j \in DN_i} \sum_i (g \cdot (h_j - h_i) + dist_{(i,j)} \cdot 2, 79)$$

Anexo H

Costo de operación de plantas de tratamiento - PlantOpC

Para calcular este costo se siguió el procedimiento utilizado para los estudios tarifarios. La metodología de cada procedimiento se encuentra detallada en el cuerpo de la presente memoria en la sección 4.5.4.

Para ver el cálculo anteriormente descrito, revisar el siguiente *link*: <https://bit.ly/30FYgkx>.

Anexo I

Fuentes de agua natural

Las fuentes de agua natural corresponden a las fuentes superficiales o subterráneas dado por las distintas cuencas hidrográficas presentes en cada región. Así, una cuenca puede tener ríos, lagos, lagunas, embalses, esteros, quebradas, etc. Cada uno de estos elementos tiene características distintivas, sin embargo, para simplificar el estudio se tomaron los principales cauces de cada región como posible fuente o salida de agua, que fueron mencionados en la sección 3.3.

Para seleccionar puntos de extracción y descarga, se asumieron los puntos ya existentes en donde se extrae agua para las plantas potabilizadoras y, además, se seleccionaron otros puntos aleatorios. Esto último es un supuesto importante debido a que pueden existir propiedades de derechos de agua o puede haber una protección del área de donde se quiera extraer el agua.

Para poder modelar los ríos, se asumen que tienen forma cúbica y lineal, con varios puntos de partida, los cuales se muestran en las Figuras I.1 y I.2 para Antofagasta y Atacama, respectivamente. Los ríos que presentan curvaturas importantes se dividieron en varias secciones, como es el caso del río Huasco, río Copiapó y río Loa.



Figura I.1: Puntos de partida de los principales ríos de Antofagasta dados por la Tabla 3.2. Figura hecha en Google Earth (®).



Figura I.2: Puntos de partida de los principales ríos de Atacama dados por la Tabla 3.4. Figura hecha en Google Earth (®).

Lo anterior puede ser explicado mediante un diagrama explicativo. En la Figura I.3 se muestra la simplificación que se realiza de los ríos en forma cúbica. En las entradas y salidas de agua no se consideran las pérdidas, extracciones o inyecciones a la fuente.

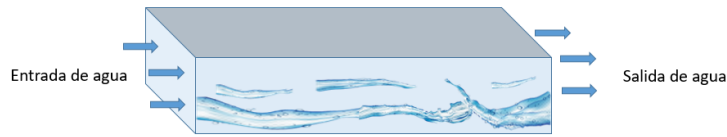


Figura I.3: Esquema de simplificación de ríos en forma cúbica, con entrada y salida de agua (sin considerar pérdidas, extracciones o inyecciones a la fuente).

Por otro lado, en la Figura I.4 se muestran los parámetros que se deben tomar en consideración para establecer algunas relaciones entre el indicador ambiental y el balance de masa de las fuentes naturales.

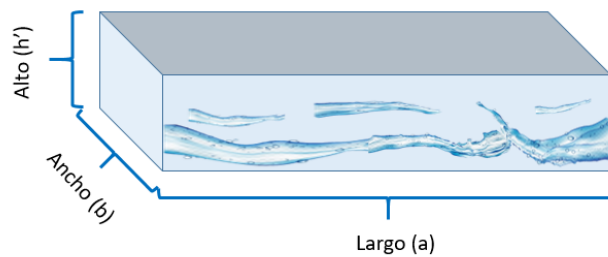


Figura I.4: Esquema de simplificación de ríos en forma cúbica, con parámetros de altura, ancho y largo de la fuente.

Finalmente, para ver las rutas de los ríos y donde se realizó la simplificación, se muestra la Figura I.5 y la Figura I.6 para las regiones de Antofagasta y Atacama, respectivamente. Se realizó una simplificación de la red hidrométrica general y se consideraron algunos de los principales cauces de extracción.



Figura I.5: Simplificación de las rutas de los principales ríos de Antofagasta, donde los puntos marcados corresponden a los nodos que representan los puntos de extracción o inyección a los ríos, y abarcan las secciones marcadas con líneas celestes. Figura hecha en Google Earth [®].

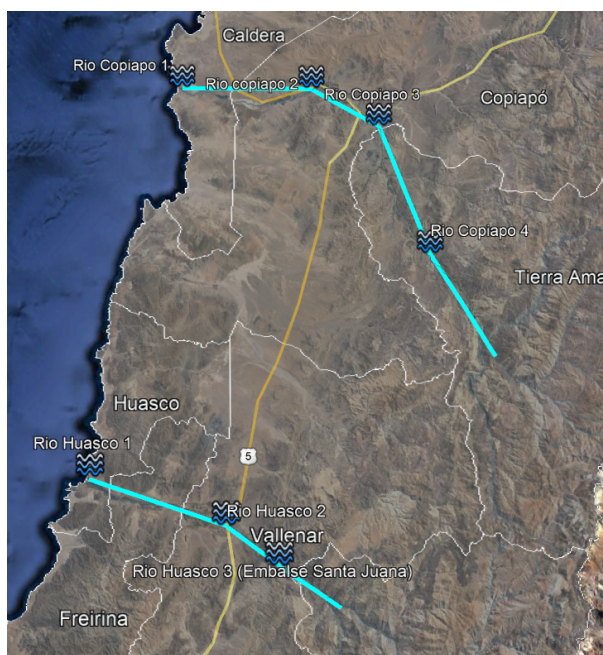


Figura I.6: Simplificación de las rutas de los principales ríos de Atacama, donde los puntos marcados corresponden a los nodos que representan los puntos de extracción o inyección a los ríos, y abarcan las secciones marcadas con líneas celestes. Figura hecha en Google Earth [®].

Anexo J

Programación por metas

La programación por metas Chebyshev tiene la noción de 'distancia' incorporada, en donde se minimiza la desviación entre cada función objetivo y su valor ideal. Para entender esta metodología es útil observar la curva de Pareto que se muestra en la Figura J.1

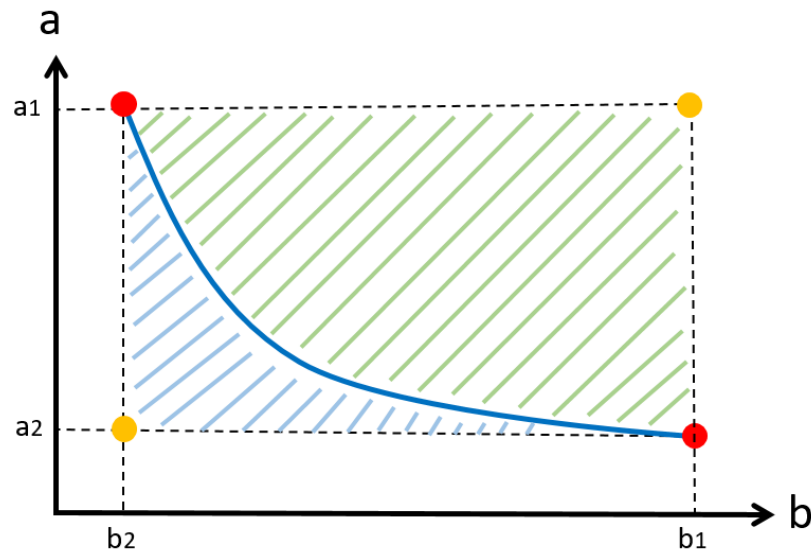


Figura J.1: Curva de Pareto para un problema multi-objetivo con dos funciones. El área en verde es la zona factible y el área en azul es la zona infactible.

Esta curva representa las posibles soluciones entre las dos funciones objetivo 'a' y 'b', dándoles diferentes importancias relativas. Por ejemplo, el punto (b_2, a_2) es el punto ideal de ambas funciones, ya que son los menores valores que pueden alcanzarse, sin embargo, el punto queda fuera de las soluciones factibles. De forma análoga, el punto (b_1, a_1) es el punto anti-ideal de ambas funciones y se encuentra dentro de la zona de factibilidad.

Así, la metodología de Chebyshev de *GP* busca minimizar una distancia entre la frontera

de pareto y el punto ideal, es decir, (b_2, a_2) , dada una importancia relativa para cada una de las funciones.

Así, si lo único que importa es la función a, entonces se obtiene el punto (b_1, a_2) . Por otro lado, si sólo importa b, entonces se obtiene el punto (b_2, a_1) . Luego, realizando distintas combinaciones entre las importancias de cada función, se va obteniendo la curva de pareto.

Así, las restricciones necesarias para esta metodología son las dadas por las ecuaciones J.1 y J.2, en donde γ representa la variable de desviación entre el valor ideal y el valor de la función y w_a/w_b representa la importancia relativa o 'peso' de cada función objetivo inicial.

$$\left(\frac{a - a_2}{a_1 - a_2} \right) \cdot w_a \leq \gamma \quad (\text{J.1})$$

$$\left(\frac{b - b_2}{b_1 - b_2} \right) \cdot w_b \leq \gamma \quad (\text{J.2})$$

Finalmente, lo que se busca minimizar será la distancia γ , por lo que la función objetivo estará dada por la ecuación J.3.

$$\min \gamma \quad (\text{J.3})$$

Anexo K

Ubicaciones de nodos

En las siguientes secciones se muestran las ubicaciones de los distintos nodos en los casos de estudio. La nomenclatura, elementos y definición de cada nodo se encuentra en Anexo L.

K.1. Ubicación nodos Antofagasta

Las ubicaciones de los distintos nodos relacionados a PTAS/PTAP y recolección o distribución existentes se muestran en la Figura K.1, en donde se observan las PTAP con marcadores amarillos, las PTAS con marcadores rojos, las PEAP (distribución) con marcador turquesa y las PEAS (recolección) con marcador morado.

Las ubicaciones de PTAP y PTAS se establecieron en base a búsqueda bibliográfica en la página corporativa y en los estudios y declaraciones de impacto ambientales encontrados.

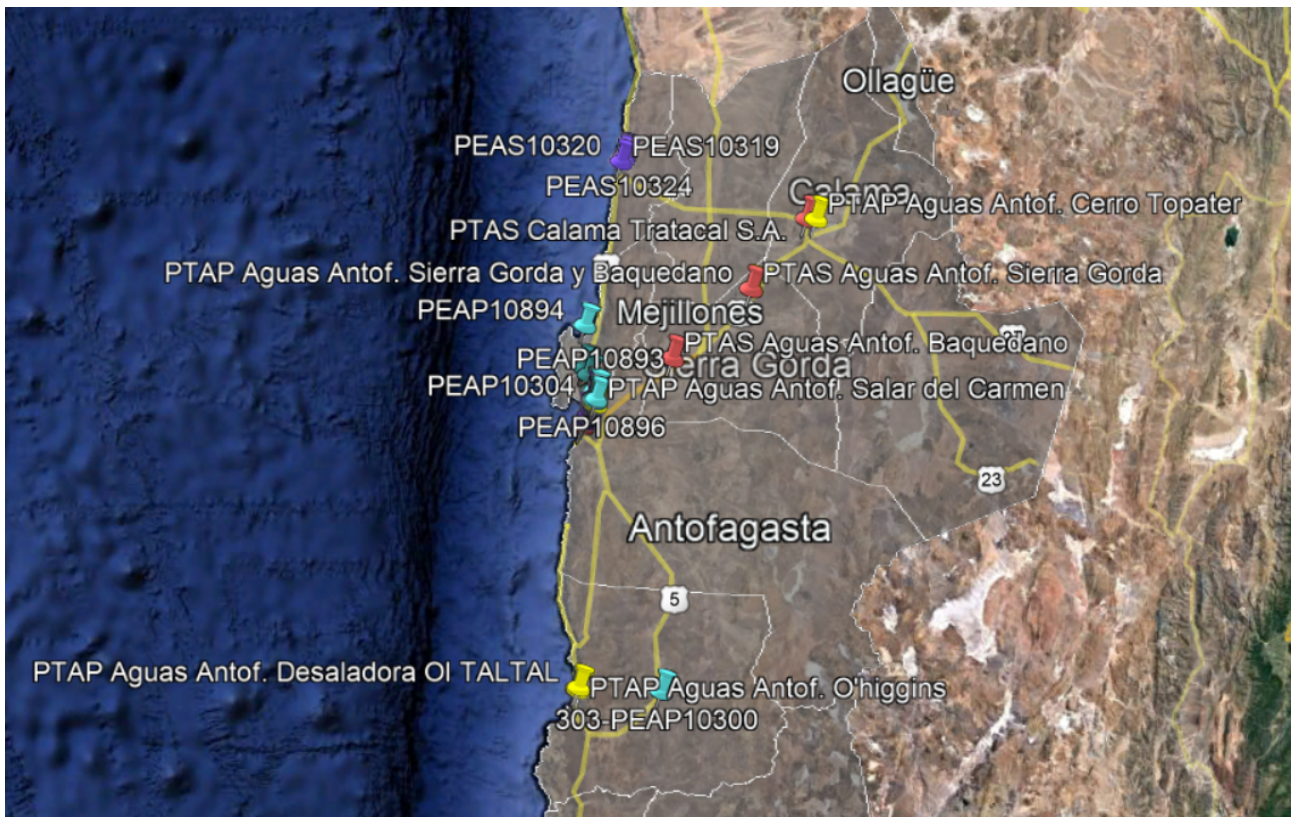


Figura K.1: Ubicación de los nodos en la región de Antofagasta. Se muestra en amarillo las PTAP, en rojo las PTAS, en turquesa las PEAP y en morado las PEAS. Elaboración propia en Google Earth ®

En específico, se tienen las PTAP en la Figura K.2, las PTAS en la Figura K.3, las PEAP en la Figura K.4 y las PEAS en la Figura K.5.

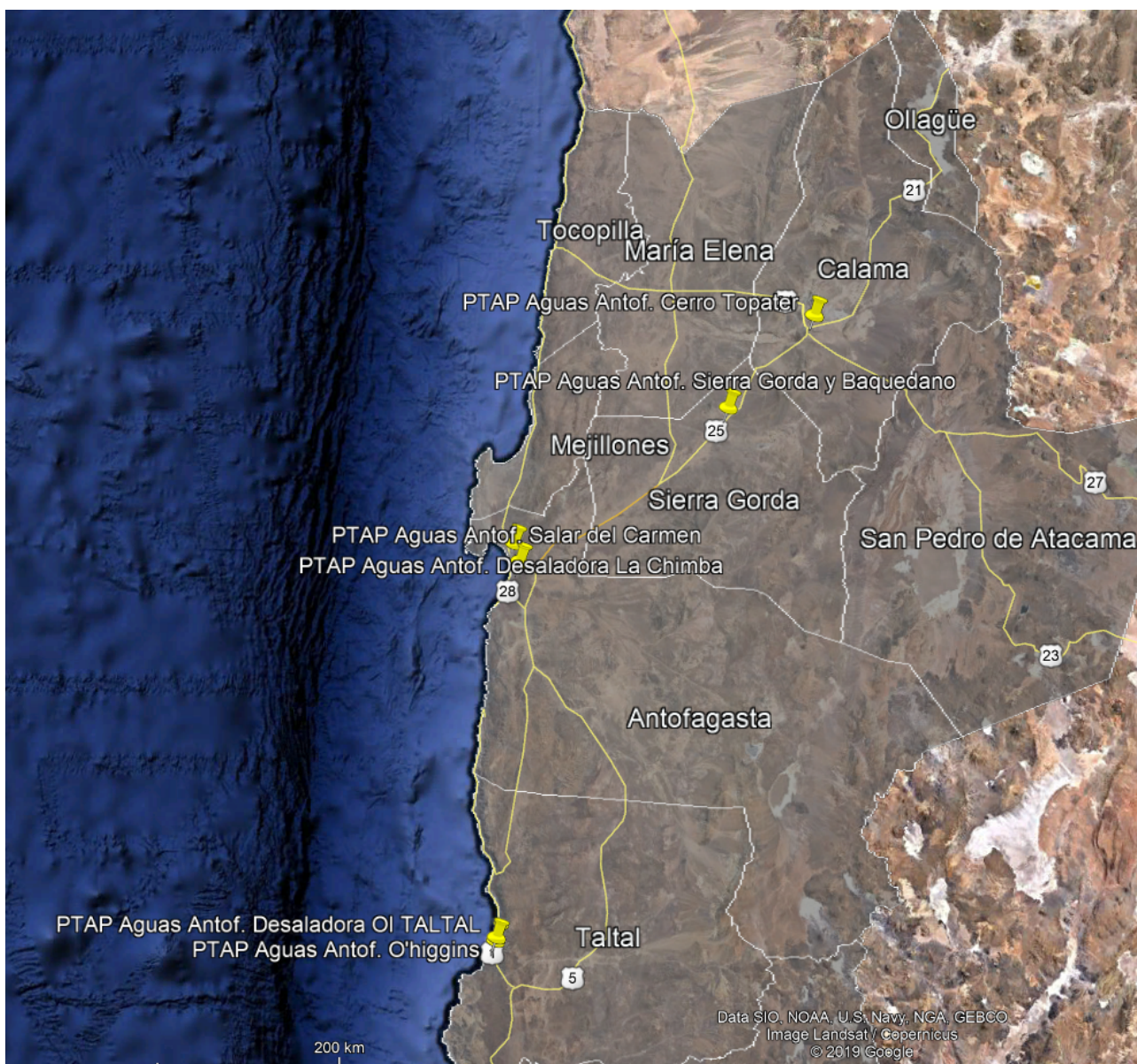


Figura K.2: Ubicación de los nodos PTAP existentes (EP) en la región de Antofagasta. Elaboración propia en Google Earth ®.

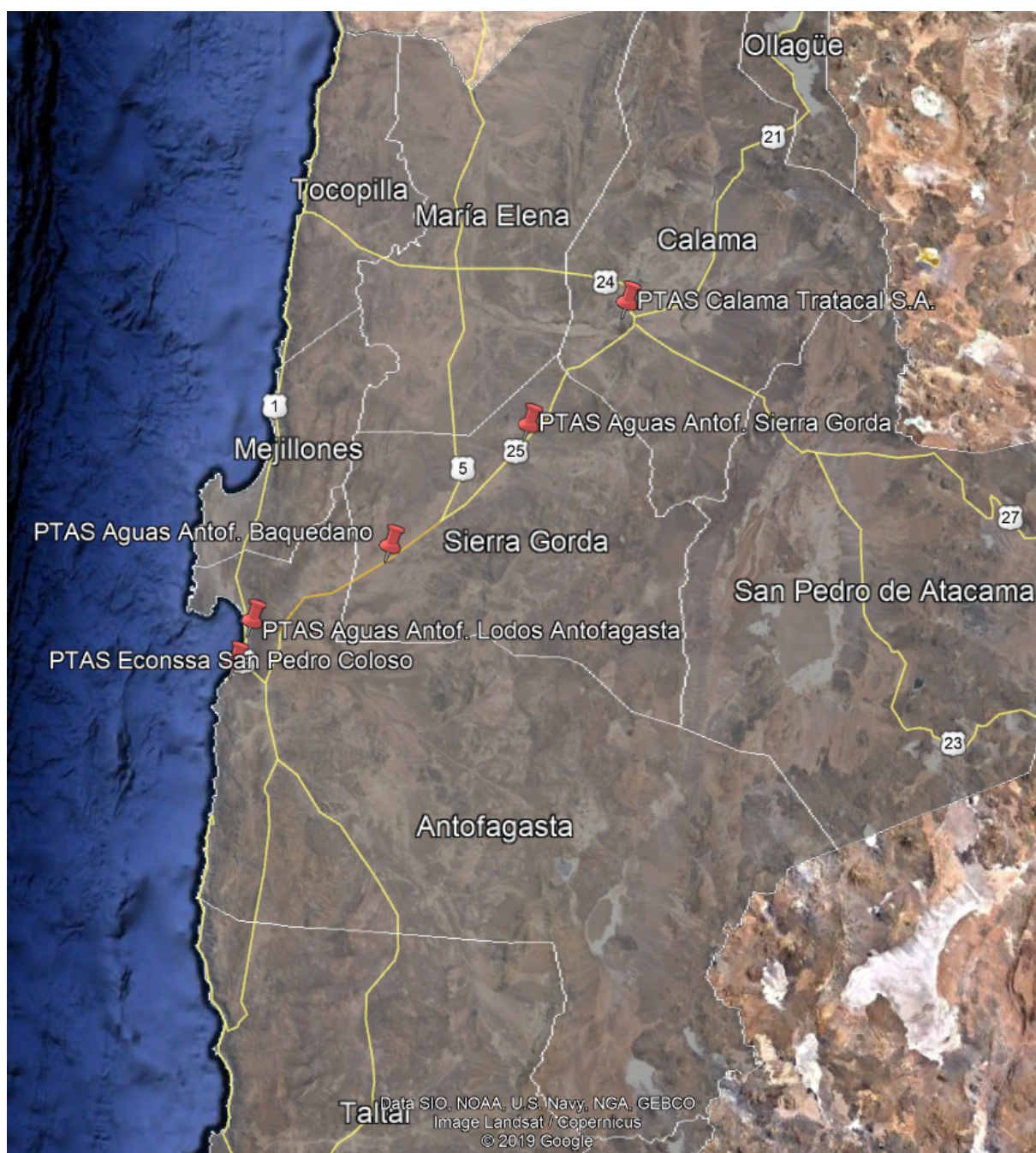


Figura K.3: Ubicación de los nodos PTAS existentes (EW) en la región de Antofagasta. Elaboración propia en Google Earth ®.

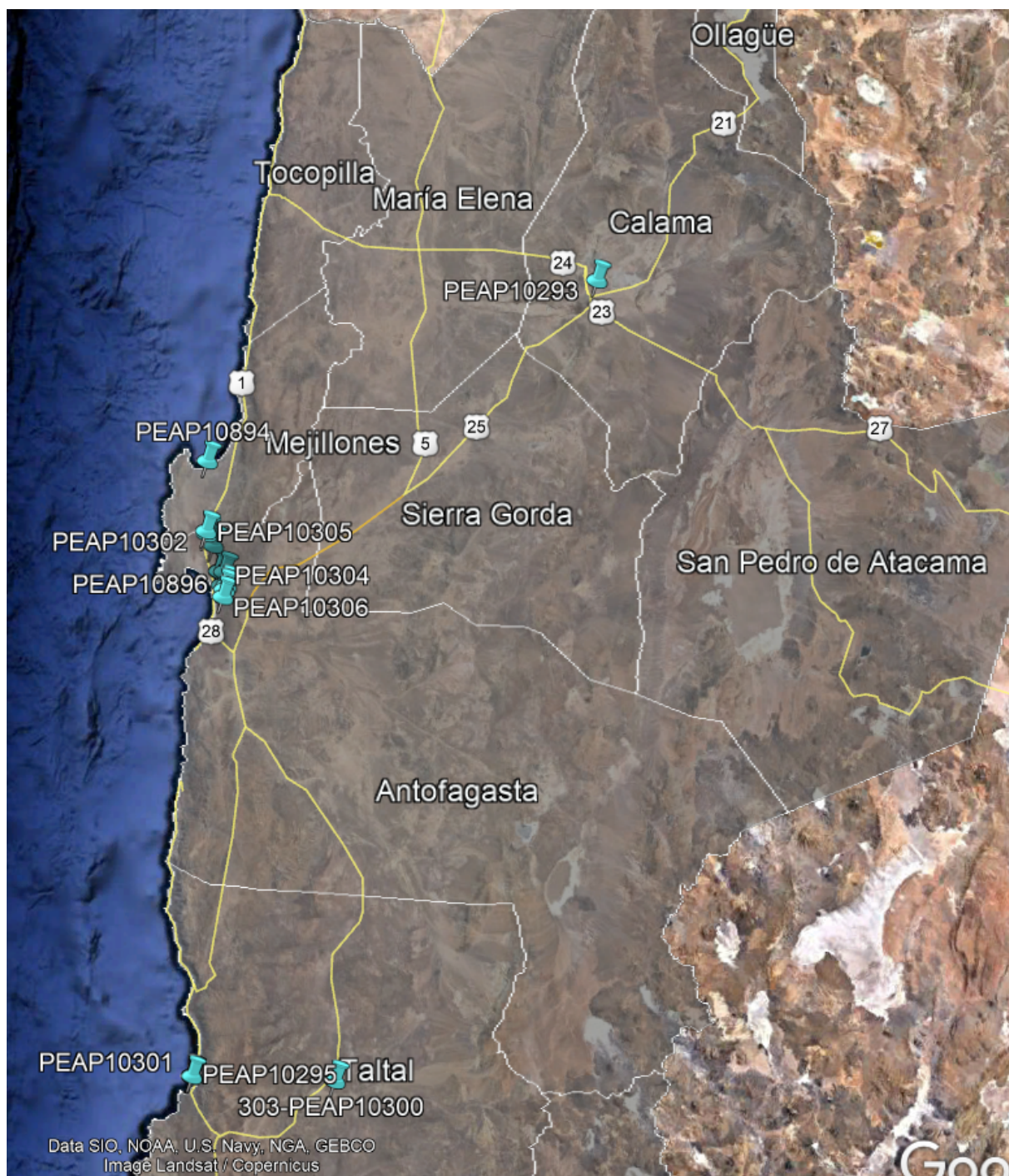


Figura K.4: Ubicación de los nodos PEAP existentes en la región de Antofagasta. Elaboración propia en Google Earth ®.

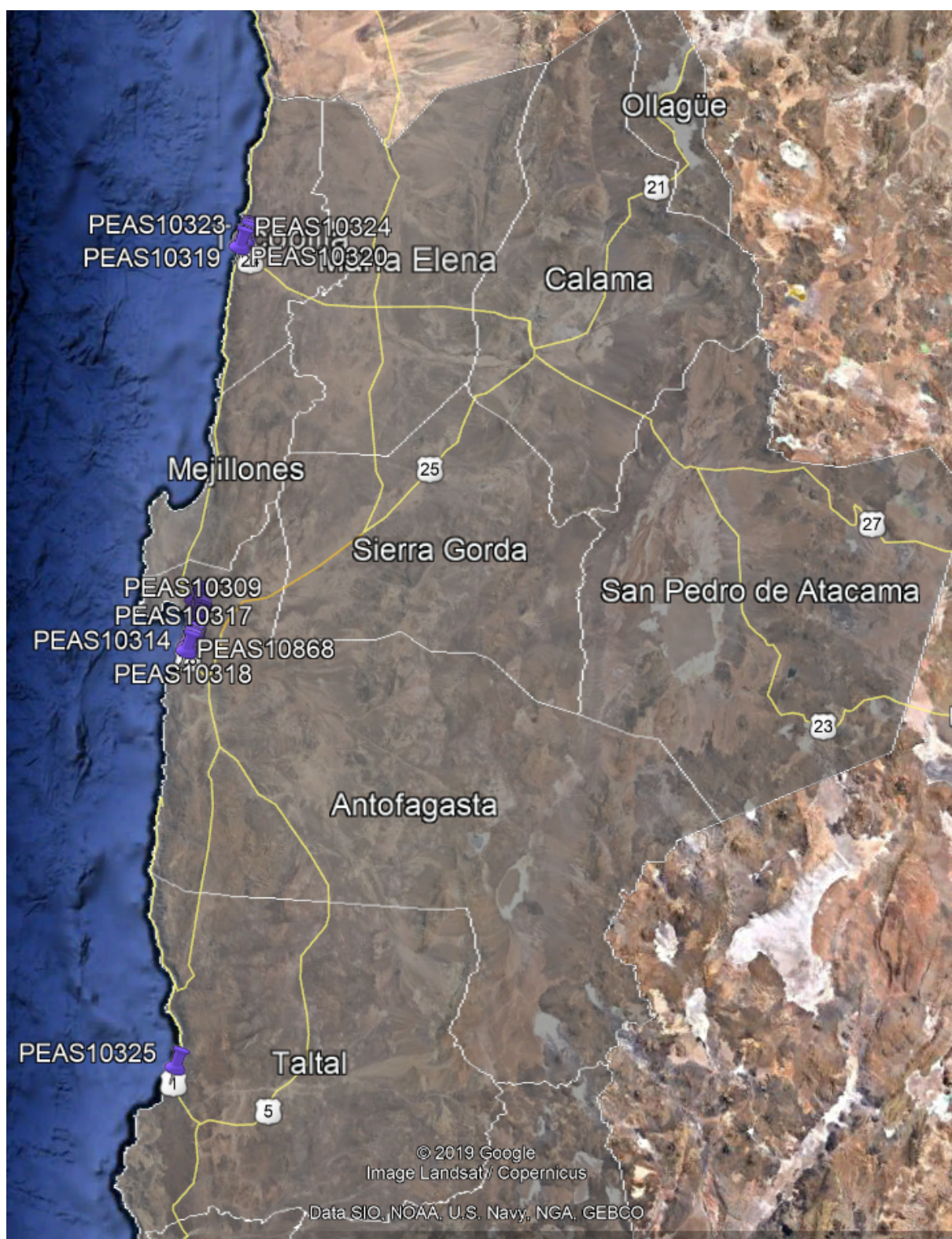


Figura K.5: Ubicación de los nodos PEAS existentes en la región de Antofagasta. Elaboración propia en Google Earth ®.

En las Figuras K.6, K.7 y K.8 se muestran las ubicaciones de los puntos de consumos

establecidos de tipo agrícola, industrial y domiciliario, respectivamente. La descripción de la nomenclatura se especifica en el Anexo L.



Figura K.6: Ubicación de los nodos de consumo agrícola existentes en la región de Antofagasta. Elaboración propia en Google Earth ®.



Figura K.7: Ubicación de los nodos de consumo industrial existentes en la región de Antofagasta. Elaboración propia en Google Earth ®.

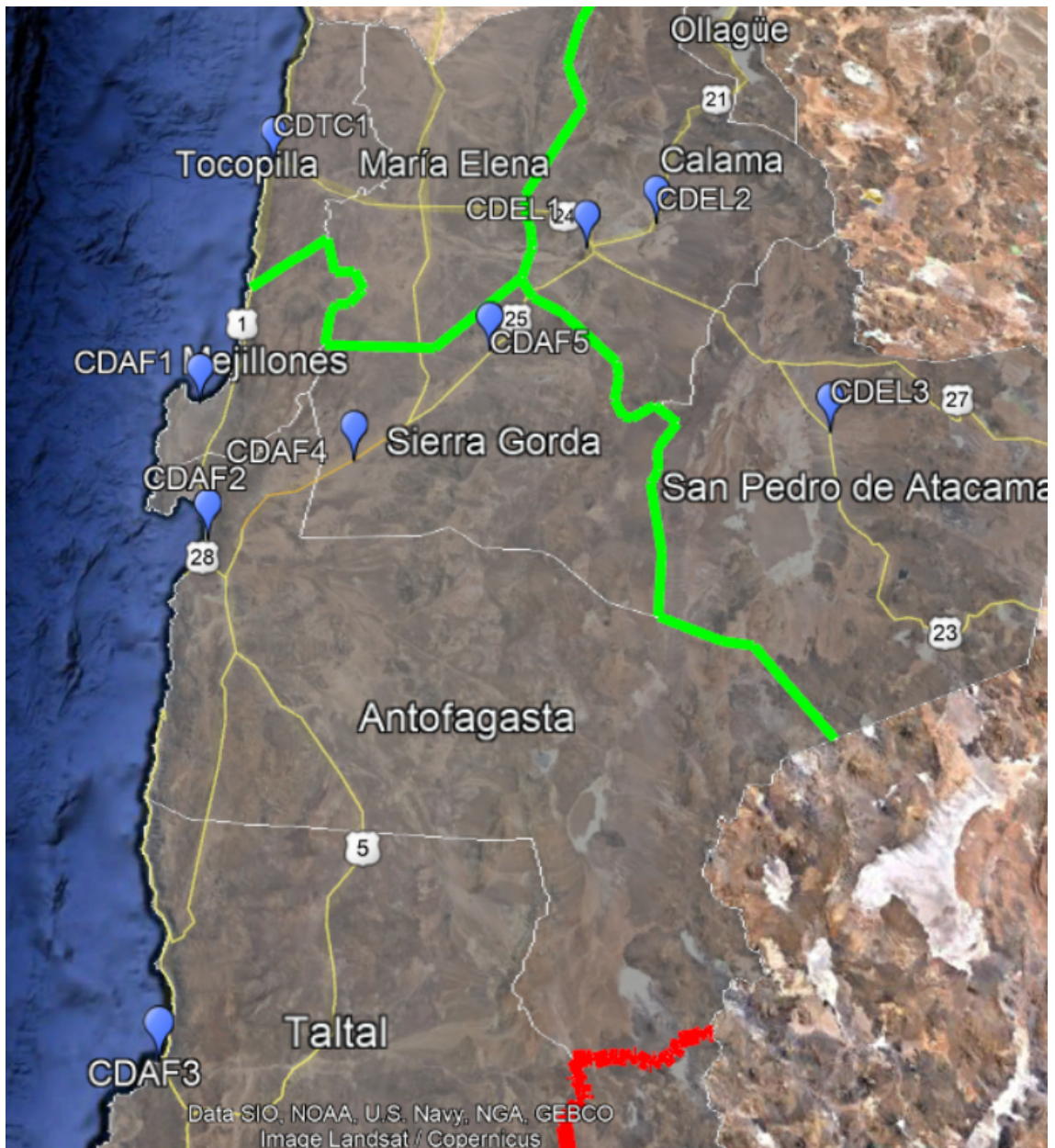


Figura K.8: Ubicación de los nodos de consumo domiciliario existentes en la región de Antofagasta. Elaboración propia en Google Earth ®.

El detalle de estas ubicaciones se encuentra en el siguiente link: <https://bit.ly/30ISfDq>, en donde las longitudes y latitudes se encuentran en sistema de grados decimales y la altura se encuentra en metros.

K.2. Ubicación nodos Atacama

Las ubicaciones de los distintos nodos relacionados a PTAS/PTAP y recolección o distribución existentes se muestran en la Figura K.9, en donde se observan las PTAP con marcadores amarillos, las PTAS con marcadores rojos, las PEAP (distribución) con marcador

turquesa y las PEAS (recolección) con marcador morado.



Figura K.9: Ubicación de los nodos en la región de Atacama. Se muestra en amarillo las PTAP, en rojo las PTAS, en turquesa las PEAP y en morado las PEAS. Elaboración propia en Google Earth ®.

En específico, se tienen las PTAP en la Figura K.10, las PTAS en la Figura K.11, las PEAP en la Figura K.12 y las PEAS en la Figura K.13.

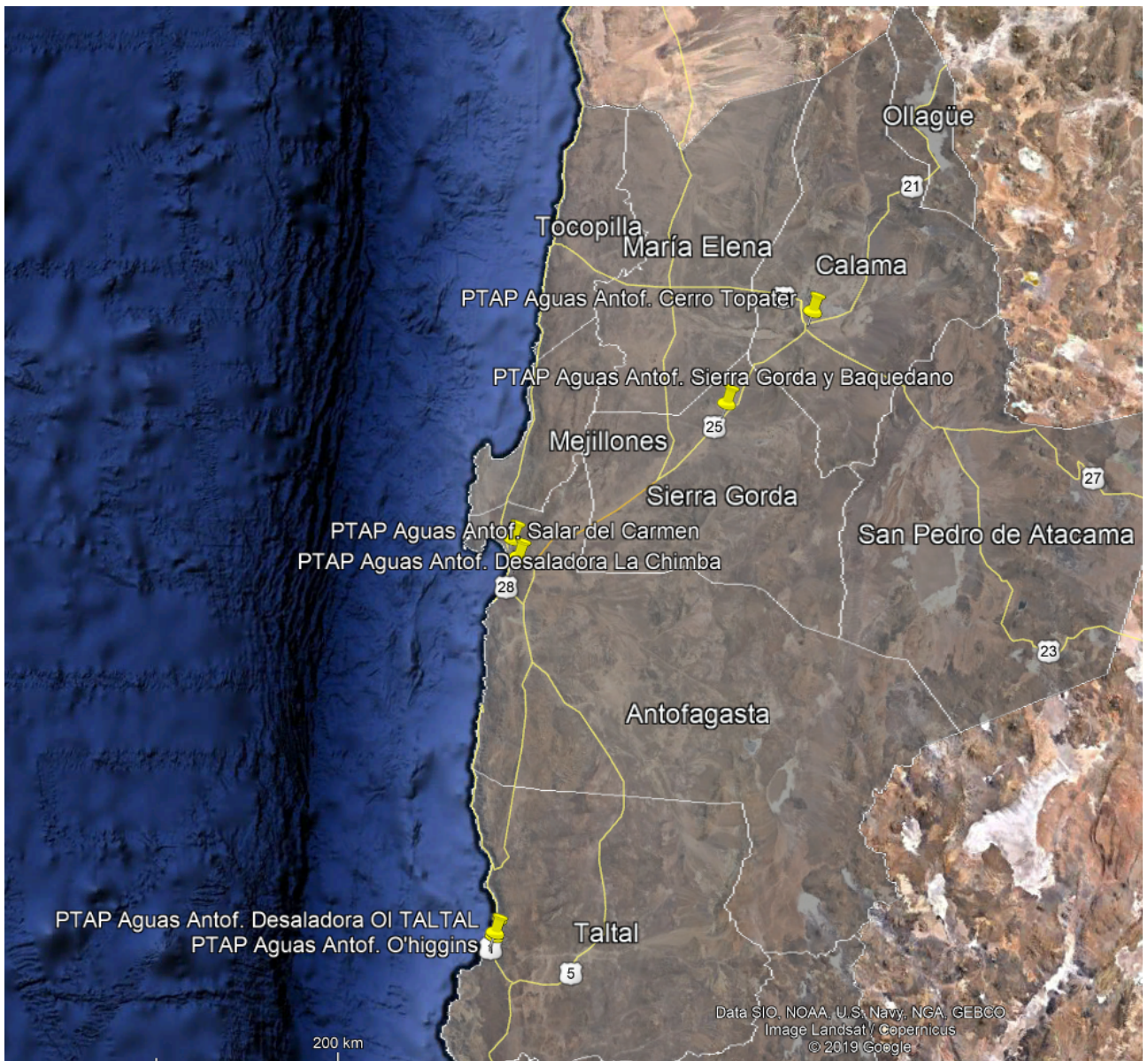


Figura K.10: Ubicación de los nodos PTAP existentes (EP) en la región de Atacama. Elaboración propia en Google Earth ®.

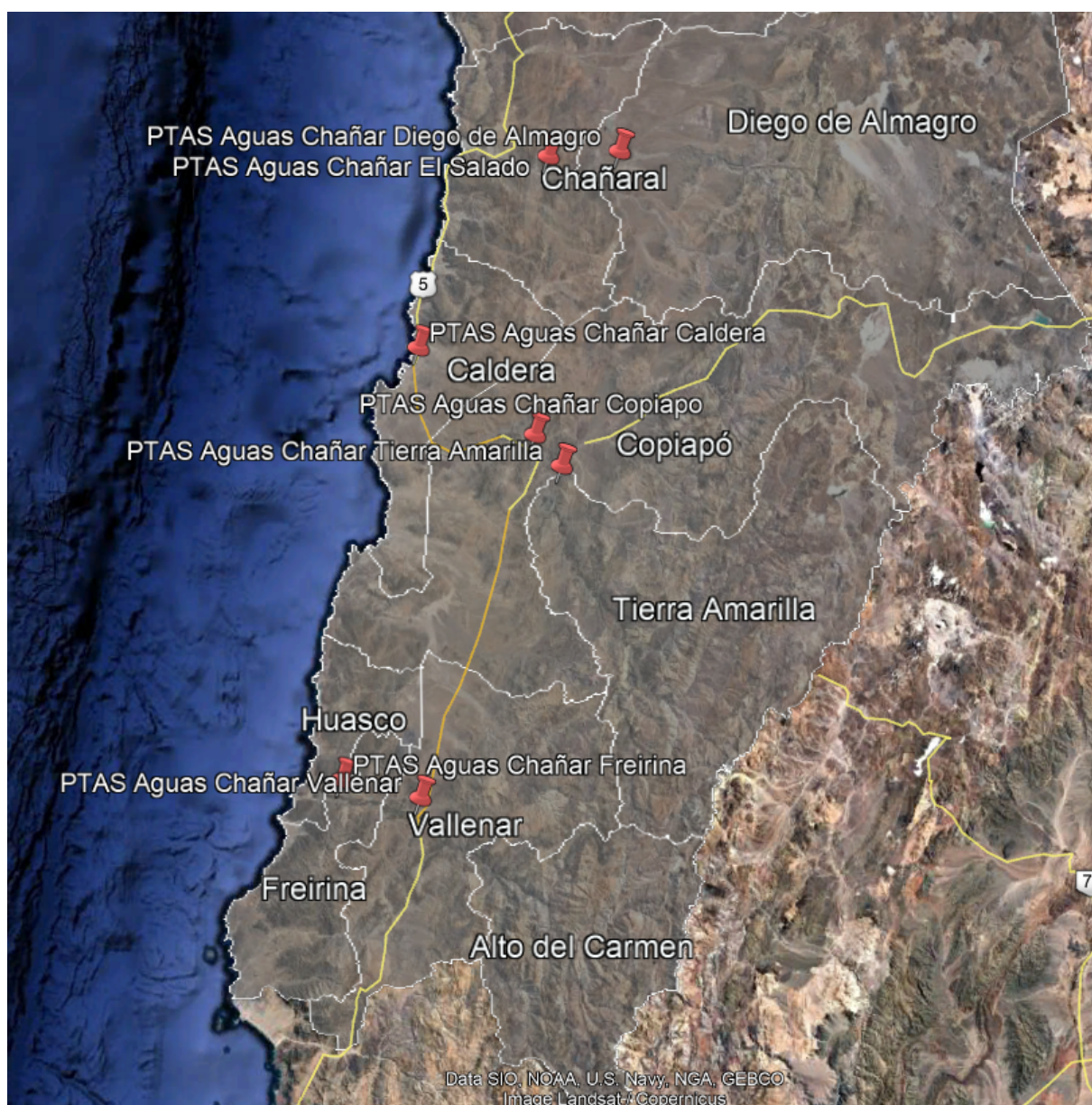


Figura K.11: Ubicación de los nodos PTAS existentes (EW) en la región de Atacama. Elaboración propia en Google Earth ®.

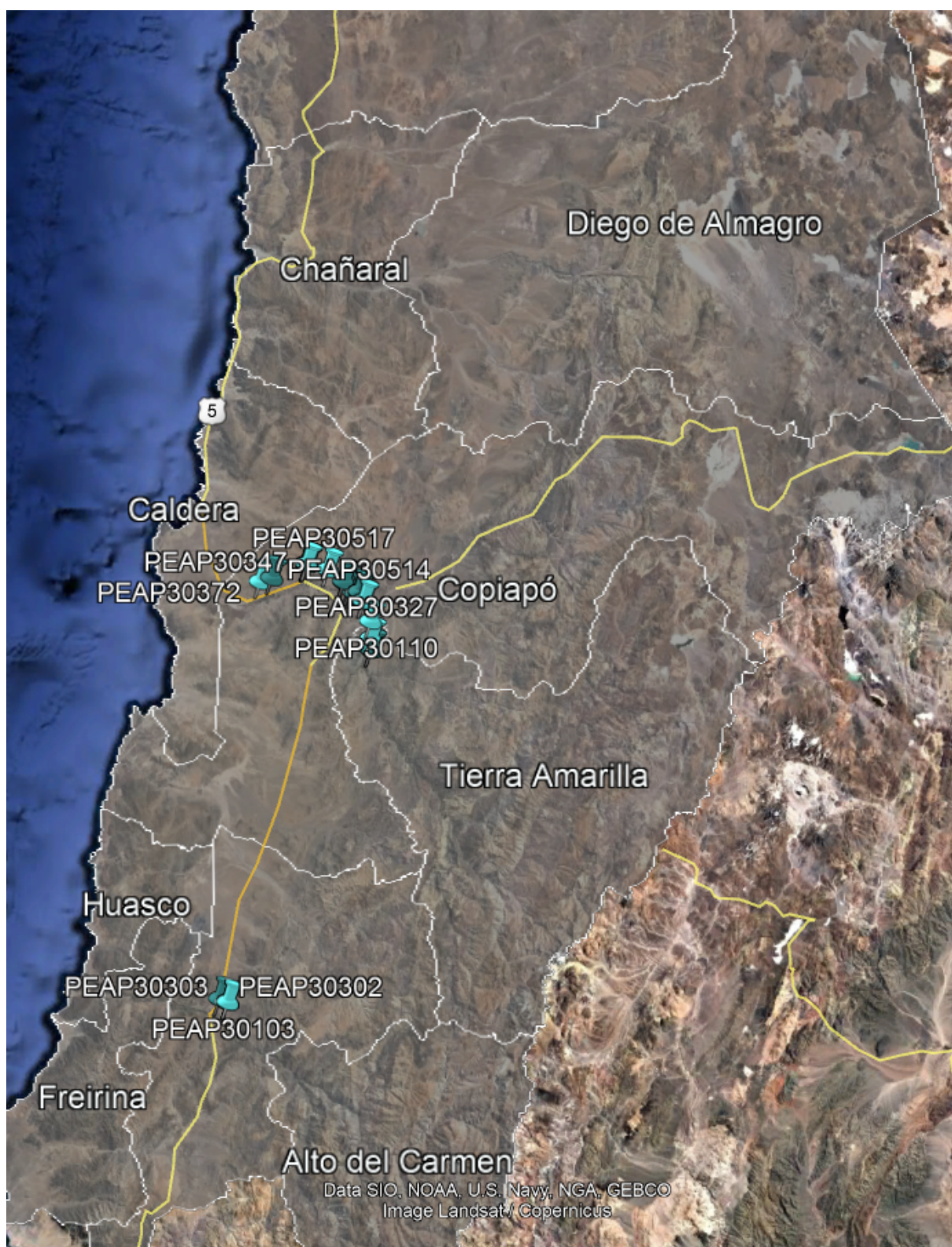


Figura K.12: Ubicación de los nodos PEAP existentes en la región de Atacama. Elaboración propia en Google Earth ®.

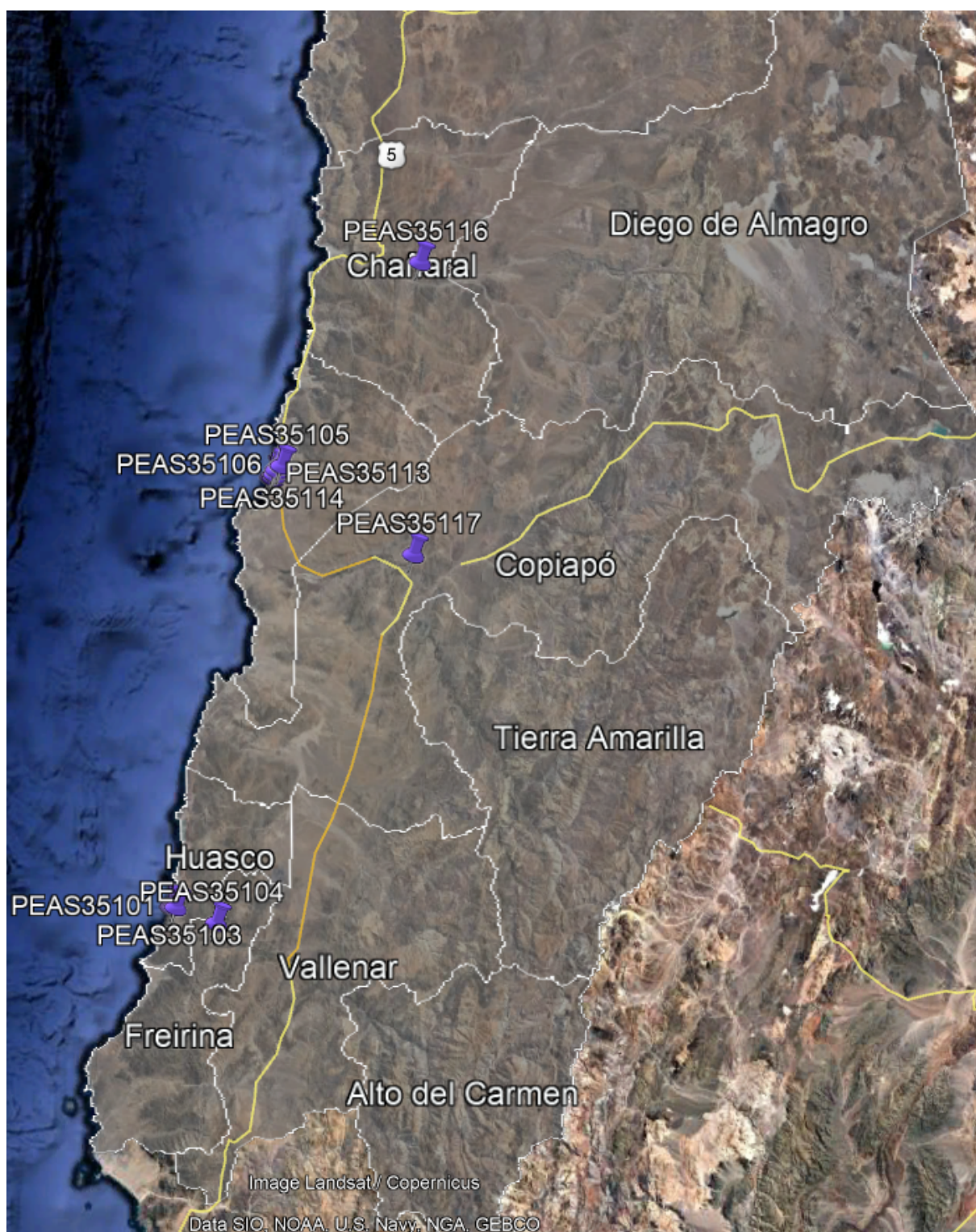


Figura K.13: Ubicación de los nodos PEAS existentes en la región de Atacama. Elaboración propia en Google Earth ®.

En las Figuras K.14, K.15 y K.16 se muestran las ubicaciones de los puntos de consumos establecidos de tipo agrícola, industrial y domiciliario, respectivamente. La descripción de la nomenclatura se especifica en el Anexo L.

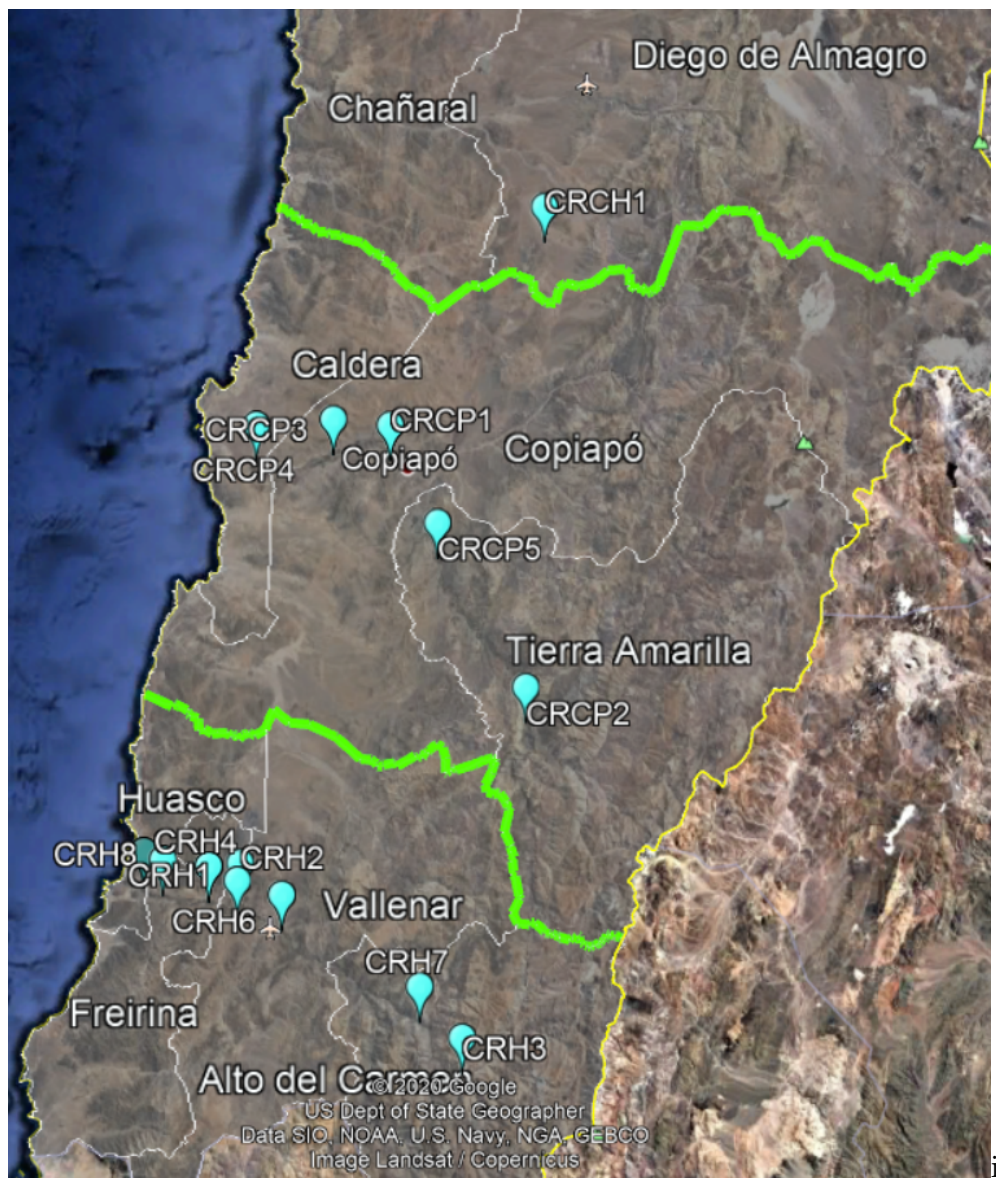


Figura K.14: Ubicación de los nodos de consumo agrícola existentes en la región de Atacama. Elaboración propia en Google Earth ®.

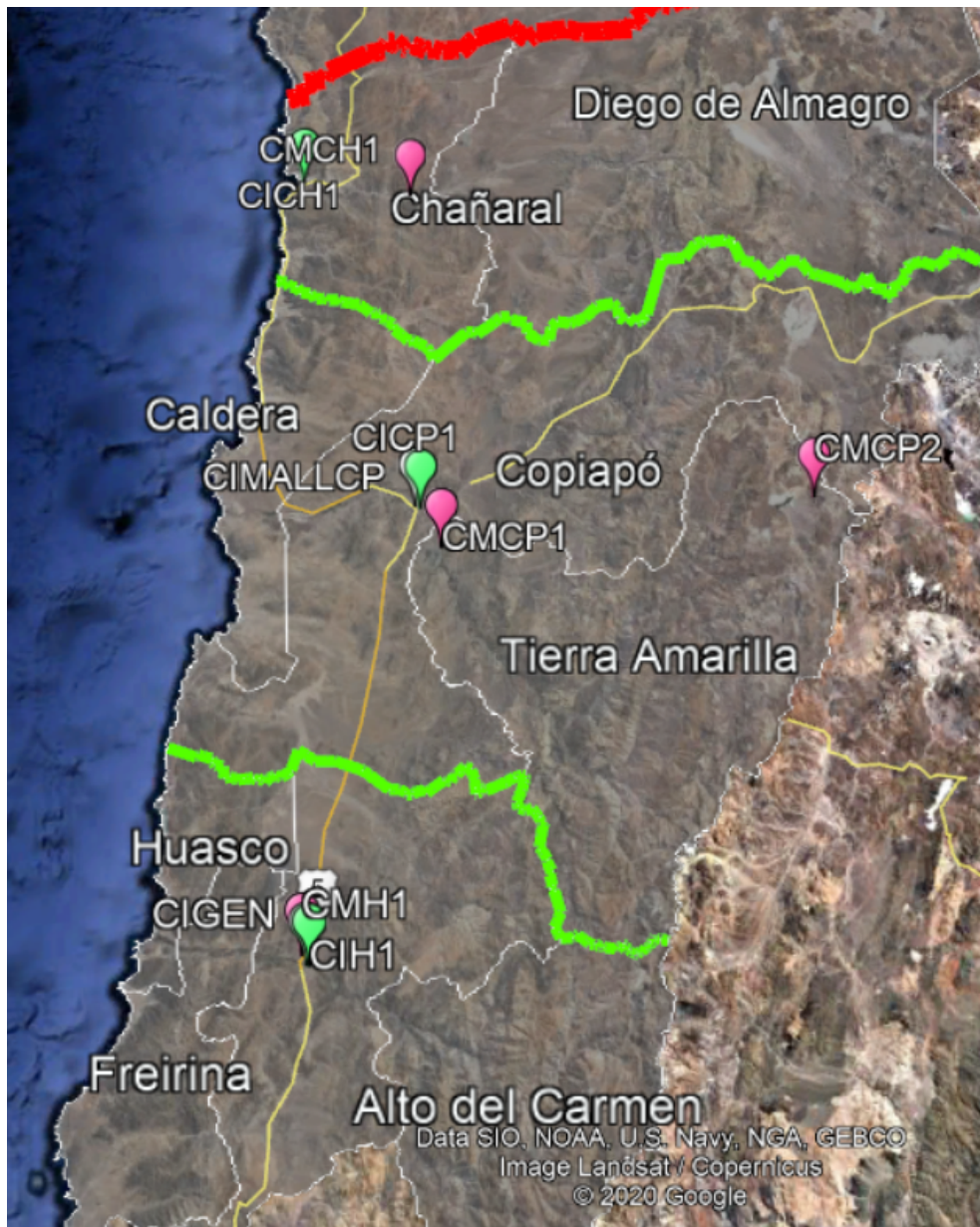


Figura K.15: Ubicación de los nodos de consumo industrial existentes en la región de Atacama. Elaboración propia en Google Earth ®.



Figura K.16: Ubicación de los nodos de consumo domiciliario existentes en la región de Atacama. Elaboración propia en Google Earth ®.

El detalle de estas ubicaciones se encuentra en el siguiente link: <https://bit.ly/30ISfDq>, en donde las longitudes y latitudes se encuentran en sistema de grados decimales y la altura se encuentra en metros.

Anexo L

Elementos de conjuntos

Los elementos y nomenclatura de elementos con los conjuntos se muestran a continuación. Las fuentes naturales se muestran en la Tabla L.1; los consumos se tienen la Tablas L.2, L.3 y L.4; los elementos de recolección se tienen en las Tablas L.5 y L.6, mientras que los de distribución están presentes en las Tablas L.7, L.9 y L.8; las PTAP existentes se encuentran en la Tabla L.10 y las PTAS existentes en la Tabla L.11; las PTAS modificadas se tienen en la Tabla L.12; las PTAS nuevas están presentes en la Tabla L.13; finalmente, las PTAP nuevas están en la Tabla L.14.

Tabla L.1: Elementos de conjunto fuente natural

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	Tocopilla	RL1	Primera sección del río Loa
		RL2	Segunda sección del río Loa
		RL3	Tercera sección del río Loa
	El Loa	RL4	Cuarta sección del río Loa
		RL5	Quinta sección del río Loa
		RSP1	Única sección del río San Pedro
		RS1	Única sección del río Salado
	RV1	Única sección del río Vilama	
Atacama	Copiapó	RCP1	Primera sección del río Copiapó
		RCP2	Segunda sección del río Copiapó
		RCP3	Tercera sección del río Copiapó
		RCP4	Cuarta sección del río Copiapó
	Huasco	RH1	Primera sección del río Huasco
		RH2	Segunda sección del río Huasco
		RH3	Tercera sección del río Huasco, termina en Embalse Santa Juana

Tabla L.2: Elementos de conjunto consumo domiciliario

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	Tocopilla	CDTC1	Único consumo domiciliario en Tocopilla
	El Loa	CDEL1	Consumo domiciliario El Loa 1
		CDEL2	Consumo domiciliario El Loa 2
		CDEL3	Consumo domiciliario El Loa 3
	Antofagasta	CDAF1	Consumo domiciliario Antofagasta 1
		CDAF2	Consumo domiciliario Antofagasta 2
		CDAF3	Consumo domiciliario Antofagasta 3
		CDAF4	Consumo domiciliario Antofagasta 4
		CDAF5	Consumo domiciliario Antofagasta 5
Atacama	Chañaral	CDCH1	Consumo domiciliario Chañaral 1
		CDCH2	Consumo domiciliario Chañaral 2
		CDCH3	Consumo domiciliario Chañaral 3
		CDCH4	Consumo domiciliario Chañaral 4
		CDCH5	Consumo domiciliario Chañaral 5
	Copiapó	CDCP1	Consumo domiciliario Copiapó 1
		CDCP2	Consumo domiciliario Copiapó 2
		CDCP3	Consumo domiciliario Copiapó 3
		CDCP4	Consumo domiciliario Copiapó 4
		CDCP5	Consumo domiciliario Copiapó 5
		CDCP6	Consumo domiciliario Copiapó 6
		CDCP7	Consumo domiciliario Copiapó 7
	Huasco	CDH1	Consumo domiciliario Huasco 1
		CDH2	Consumo domiciliario Huasco 2

Tabla L.3: Elementos de conjunto consumo industrial

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	Tocopilla	CITC1	Consumo industrial provincial en Tocopilla
		CIHOS	Consumo industrial grande en Tocopilla, correspondiente a Hospital Marcos Macuada
		CMTC1	Consumo minero agrupado en Tocopilla 1
	El Loa	CIEL1	Consumo industrial provincial en El Loa
		CIMALLCL	Consumo industrial grande en El Loa, correspondiente a Mall Calama
		CMEL1	Consumo minero agrupado en El Loa 1
		CMEL2	Consumo minero agrupado en El Loa 2
	Antofagasta	CIAF1	Consumo industrial provincial en Antofagasta
		CIJMB	Consumo industrial grande en Antofagasta, correspondiente a Jumbo
CMAF1		Consumo minero agrupado en Antofagasta 1	
Atacama	Chañaral	CICH1	Consumo industrial provincial en Chañaral
		CMCH1	Consumo minero agrupado en Chañaral 1
	Copiapó	CICP1	Consumo industrial provincial en Copiapó
		CIMALLCP	Consumo industrial grande en El Loa, correspondiente a Mall Plaza Copiapó
		CMCP1	Consumo minero agrupado en Copiapó 1
		CMCP2	Consumo minero agrupado en Copiapó 2
	Huasco	CIH1	Consumo industrial provincial en Huasco
		CIGEN	Consumo industrial grande en Antofagasta, correspondiente a Gendarmería de Vallenar
		CMH1	Consumo minero agrupado en Huasco 1

Tabla L.4: Elementos de conjunto consumo agrícola

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	El Loa	CREL1	Consumo agrícola/riego en El Loa 1
	Antofagasta	CRAF1	Consumo agrícola/riego en Antofagasta 1
		CRAF2	Consumo agrícola/riego en Antofagasta 2
Atacama	Copiapó	CRCP1	Consumo agrícola/riego en Copiapó 1
		CRCP2	Consumo agrícola/riego en Copiapó 2
		CRCP3	Consumo agrícola/riego en Copiapó 3
		CRCP4	Consumo agrícola/riego en Copiapó 4
		CRCP5	Consumo agrícola/riego en Copiapó 5
		CRCP6	Consumo agrícola/riego en Copiapó 6
	Huasco	CRH1	Consumo agrícola/riego en Huasco 1
		CRH2	Consumo agrícola/riego en Huasco 2
		CRH3	Consumo agrícola/riego en Huasco 3
		CRH4	Consumo agrícola/riego en Huasco 4
		CRH5	Consumo agrícola/riego en Huasco 5
		CRH6	Consumo agrícola/riego en Huasco 6

Tabla L.5: Elementos de conjunto recolección para Antofagasta

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	Tocopilla	PEAS10322	Planta de elevación de aguas servidas 10322, según nomenclatura MOP
		PEAS10323	PEAS N° 10323, según MOP
		PEAS10324	PEAS N° 10324, según MOP
		PEAS10320	PEAS N° 10320, según MOP
		PEAS10319	PEAS N° 10319, según MOP
		<i>R_TC</i>	Planta de elevación de aguas servidas nueva, en zona central de Tocopilla
	El Loa	<i>R_EL</i>	Planta de elevación de aguas servidas nueva, en zona central de El Loa
	Antofagasta	PEAS10332	PEAS N° 10332, según MOP
		PEAS10313	PEAS N° 10313, según MOP
		PEAS10308	PEAS N° 10308, según MOP
		PEAS10309	PEAS N° 10309, según MOP
		PEAS10310	PEAS N° 10310, según MOP
		PEAS10311	PEAS N° 10311, según MOP
		PEAS10312	PEAS N° 10312, según MOP
		PEAS10328	PEAS N° 10328, según MOP
		PEAS10315	PEAS N° 10315, según MOP
		PEAS10307	PEAS N° 10307, según MOP
		PEAS10314	PEAS N° 10314, según MOP
		PEAS10317	PEAS N° 10317, según MOP
		PEAS10318	PEAS N° 10318, según MOP
PEAS10868		PEAS N° 10868, según MOP	
PEAS10325	PEAS N° 10325, según MOP		
<i>R_AF</i>	Planta de elevación de aguas servidas nueva, en zona central de Antofagasta		

Tabla L.6: Elementos de conjunto recolección para Atacama

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Atacama	Chañaral	PEAS35116	Planta de elevación de aguas servidas 35116, según nomenclatura MOP
		<i>R_CH</i>	Planta de elevación de aguas servidas nueva, en zona central de Chañaral
	Copiapó	PEAS35106	PEAS N° 35106, según MOP
		PEAS35111	PEAS N° 35111, según MOP
		PEAS35112	PEAS N° 35112, según MOP
		PEAS35113	PEAS N° 35113, según MOP
		PEAS35114	PEAS N° 35114, según MOP
		PEAS35117	PEAS N° 35117, según MOP
		<i>R_CP</i>	Planta de elevación de aguas servidas nueva, en zona central de Copiapó
	Huasco	PEAS35101	PEAS N° 35101, según MOP
		PEAS35102	PEAS N° 35102, según MOP
		PEAS35103	PEAS N° 35103, según MOP
		PEAS35104	PEAS N° 35104, según MOP
		<i>R_H</i>	Planta de elevación de aguas servidas nueva, en zona central de Huasco

Tabla L.7: Elementos de conjunto distribución para Antofagasta

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	Tocopilla	<i>D_TC</i>	Planta de elevación de agua potable nueva, en zona central de Tocopilla
	El Loa	PEAP10293	PEAP N° 10293, según MOP
		<i>D_EL</i>	Planta de elevación de agua potable nueva, en zona central de El Loa
	Antofagasta	PEAP10894	PEAP N° 10894, según MOP
		PEAP10302	PEAP N° 10302, según MOP
		PEAP10305	PEAP N° 10305, según MOP
		PEAP10292	PEAP N° 10292, según MOP
		PEAP10294	PEAP N° 10294, según MOP
		PEAP10893	PEAP N° 10893, según MOP
		PEAP10303	PEAP N° 10303, según MOP
		PEAP10896	PEAP N° 10896, según MOP
		PEAP10310	PEAP N° 10310, según MOP
		PEAP10304	PEAP N° 10304, según MOP
		PEAP10306	PEAP N° 10306, según MOP
		PEAP10295	PEAP N° 10295, según MOP
		303-PEAP10303	PEAP N° 303-10303, según MOP
		303-PEAP10302	PEAP N° 303-10302, según MOP
		303-PEAP10301	PEAP N° 303-10301, según MOP
303-PEAP10300	PEAP N° 303-10300, según MOP		
<i>D_AF</i>	Planta de elevación de agua potable nueva, en zona central de Antofagasta		

Tabla L.8: Elementos de conjunto de distribución para Copiapó

PEAP30372	PEAP N° 30372, según MOP
PEAP30371	PEAP N° 30371, según MOP
PEAP30360	PEAP N° 30360, según MOP
PEAP30114	PEAP N° 30114, según MOP
PEAP30358	PEAP N° 30358, según MOP
PEAP30201	PEAP N° 30201, según MOP
PEAP30346	PEAP N° 30346, según MOP
PEAP30347	PEAP N° 30347, según MOP
PEAP30356	PEAP N° 30356, según MOP
PEAP30364	PEAP N° 30364, según MOP
PEAP30517	PEAP N° 30517, según MOP
PEAP30111	PEAP N° 30111, según MOP

PEAP301115	PEAP N° 301115, según MOP
PEAP301116	PEAP N° 301116, según MOP
PEAP30314	PEAP N° 30314, según MOP
PEAP30312	PEAP N° 30312, según MOP
PEAP30507	PEAP N° 30507, según MOP
PEAP30107	PEAP N° 30107, según MOP
PEAP30108	PEAP N° 30108, según MOP
PEAP30511	PEAP N° 30511, según MOP
PEAP30113	PEAP N° 30113, según MOP
PEAP30348	PEAP N° 30348, según MOP
PEAP30514	PEAP N° 30514, según MOP
PEAP30322	PEAP N° 30322, según MOP
PEAP30110	PEAP N° 30110, según MOP
PEAP30327	PEAP N° 30327, según MOP
PEAP30355	PEAP N° 30355, según MOP
PEAP30362	PEAP N° 30362, según MOP
<i>D_CP</i>	Planta de elevación de agua potable nueva, en zona central de Copiapó

Tabla L.9: Elementos de conjunto distribución para Chañaral y Huasco, Atacama

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Atacama	Chañaral	<i>D_CH</i>	Planta de elevación de agua potable nueva, en zona central de Chañaral
	Huasco	PEAP30367	PEAP N° 30367, según MOP
		PEAP30301	PEAP N° 30301, según MOP
		PEAP30302	PEAP N° 30302, según MOP
		PEAP30303	PEAP N° 30303, según MOP
		PEAP30103	PEAP N° 30103, según MOP
	<i>D_H</i>	Planta de elevación de agua potable nueva, en zona central de Huasco	

Tabla L.10: Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua potable existentes

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	El Loa	<i>EP1_AACT</i>	PTAP tradicional, empresa Aguas Antofagasta, planta Cerro Topater
	Antofagasta	<i>EP1_AASGB</i>	PTAP tradicional, empresa Aguas Antofagasta, planta Sierra Gorda y Baquedano
		<i>EP1_AASC</i>	PTAP tradicional, empresa Aguas Antofagasta, planta Salar del Carmen
		<i>EP1_AAOH</i>	PTAP tradicional, empresa Aguas Antofagasta, planta O'higgins
		<i>EP2_AALC</i>	PTAP desaladora, empresa Aguas Antofagasta, planta La Chimba
		<i>EP2_AATT</i>	PTAP desaladora, empresa Aguas Antofagasta, planta Tal Tal
Atacama	Chañaral	<i>EP1_ACDA</i>	PTAP osmosis inversa, empresa Aguas Chañar, planta Diego de Almagro
		<i>EP1_ACIO</i>	PTAP osmosis inversa, empresa Aguas Chañar, planta Inca del Oro
	Copiapó	<i>EP1_ACPC</i>	PTAP osmosis inversa, empresa Aguas Chañar, planta Piedra Colgada
		<i>EP1_ACP</i>	PTAP osmosis inversa, empresa Aguas Chañar, planta Placilla
		<i>EP1_ACN</i>	PTAP osmosis inversa, empresa Aguas Chañar, planta Nantoco

Tabla L.11: Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua servida existentes

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	El Loa	<i>EW_TC</i>	PTAS tradicional, empresa Tratacal, planta Calama
	Antofagasta	<i>EW_AASG</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Antofagasta, planta Sierra Gorda
		<i>EW_AAB</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Antofagasta, planta Baquedano
		<i>EW_AALA</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Antofagasta, planta Lodos Antofagasta
		<i>EW_ESPC</i>	PTAS tradicional, empresa Econssa, planta San Pedro Coloso
Atacama	Chañaral	<i>EW_ACDA</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Chañar, planta Diego de Almagro
		<i>EW_ACES</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Chañar, planta El Salado
	Copiapó	<i>EW_ACC</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Chañar, planta Caldera
		<i>EW_ACCO</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Chañar, planta Copiapó
		<i>EW_ACTA</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Chañar, planta Tierra Amarilla
	Huasco	<i>EW_ACF</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Chañar, planta Freirina
		<i>EW_ACV</i>	PTAS tradicional, empresa Aguas Chañar, planta Vallenar

Tabla L.12: Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua servida modificadas

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	El Loa	<i>MW_TC</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Tratacal, planta Calama
	Antofagasta	<i>MW_AASG</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Antofagasta, planta Sierra Gorda
		<i>MW_AAB</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Antofagasta, planta Baquedano
		<i>MW_AALA</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Antofagasta, planta Lodos Antofagasta
		<i>MW_ESPC</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Econsssa, planta San Pedro Coloso
Atacama	Chañaral	<i>MW_ACDA</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Chañar, planta Diego de Almagro
		<i>MW_ACES</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Chañar, planta El Salado
	Copiapó	<i>MW_ACC</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Chañar, planta Caldera
		<i>MW_ACCO</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Chañar, planta Copiapó
		<i>MW_ACTA</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Chañar, planta Tierra Amarilla
	Huasco	<i>MW_ACF</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Chañar, planta Freirina
		<i>MW_ACV</i>	PTAS modificada con salida potable, empresa Aguas Chañar, planta Vallenar

Tabla L.13: Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua servida nuevas

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	Tocopilla	<i>NW_TC</i>	PTAS nueva con salida potable
	El Loa	<i>NW_EL</i>	PTAS nueva con salida potable
	Antofagasta	<i>NW_AF</i>	PTAS nueva con salida potable
Atacama	Chañaral	<i>NW_CH</i>	PTAS nueva con salida potable
	Copiapó	<i>NW_CP</i>	PTAS nueva con salida potable
	Huasco	<i>NW_H</i>	PTAS nueva con salida potable

Tabla L.14: Elementos de conjunto plantas de tratamiento de agua potable nuevas

Caso de estudio	Provincia	Elemento	Descripción
Antofagasta	Tocopilla	<i>NP1_TC</i>	Nueva PTAP de tratamiento de agua superficial/subterránea
		<i>NP2_TC</i>	Nueva PTAP desalinizadora
		<i>NP3_TC</i>	Nueva PTAP de tratamiento de agua lluvia
	El Loa	<i>NP1_EL</i>	Nueva PTAP de tratamiento de agua superficial/subterránea
		<i>NP2_EL</i>	Nueva PTAP desalinizadora
		<i>NP3_EL</i>	Nueva PTAP de tratamiento de agua lluvia
	Antofagasta	<i>NP2_AF</i>	Nueva PTAP desalinizadora
		<i>NP3_AF</i>	Nueva PTAP de tratamiento de agua lluvia
	Atacama	Copiapó	<i>NP2_CH</i>
<i>NP3_CH</i>			Nueva PTAP de tratamiento de agua lluvia
Copiapó		<i>NP1_CP</i>	Nueva PTAP de tratamiento de agua superficial/subterránea
		<i>NP2_CP</i>	Nueva PTAP desalinizadora
		<i>NP3_CP</i>	Nueva PTAP de tratamiento de agua lluvia
Huasco		<i>NP1_H</i>	Nueva PTAP de tratamiento de agua superficial/subterránea
		<i>NP2_H</i>	Nueva PTAP desalinizadora
		<i>NP3_H</i>	Nueva PTAP de tratamiento de agua lluvia

Anexo M

Parámetros del problema de optimización

Para encontrar los parámetros del problema de optimización fue necesario analizar el caso base, para lo cual se realizó el balance de masa de la situación actual. Ver el siguiente link para ver los datos: <https://bit.ly/2wox276>.

Los parámetros que no se encuentran detallados en el balance de masa del caso base se muestran en la Tabla M.1

Tabla M.1: Otros parámetros para problema de optimización

Parámetro	Descripción	Valor
M	Relacionado a la metodología 'Big M' de las ecuaciones 5.21 y 5.22	1.000.000
g	Fuerza de gravedad [m/s^2]	9,8
T	Tiempo anual de operación [h/año]	8760
E	Costo por unidad de energía [USD/kWh]	0,104
CS	Holgura para la demanda, según la ecuación 5.16	0,5
WLK0	Porcentaje de pérdida para fuentes naturales %	20
WLJ0-WLNP-WLNW-WLMW-WLEW	Porcentaje de pérdida para plantas de tratamiento de agua, potable y servida %	10
WLI0	Porcentaje de pérdida para consumo domiciliario %	10
WLI1	Porcentaje de pérdida para consumo industrial %	20
WLI2	Porcentaje de pérdida para consumo agrícola %	50
WLK1	Porcentaje de pérdida para distribución %	20
WLK2	Porcentaje de pérdida para recolección %	15

Para encontrar las distancias y diferencias de alturas se siguieron las ecuaciones 5.34 y 5.33, respectivamente. Los códigos y archivos excel generados y requeridos se muestran en el siguiente link <https://bit.ly/2MpoelL>. Los códigos a utilizar en Matlab se muestran a continuación.

M.1. Códigos Matlab para cálculo de diferencia de altura y distancias

```

1 function DH= DeltaH(HO,HD)
DH=zeros(length(HO),length(HD));
3     for i=1:length(HO)
         for j=1:length(HD)
5             if HD(j)-HO(i)<0
                 DH(i,j)=0;
7             else
                 DH(i,j)=HD(j)-HO(i);
9         end
     end
11 end

```

```

1 function dist= Distancia(phi1,phi2,lambda1,lambda2,r)
dist=zeros(length(phi1),length(phi2));
3     for i=1:length(phi1)
         for j=1:length(phi2)
5             A=(sin((phi2(j)-phi1(i))./2)).^2;
                 B=(sin((lambda2(j)-lambda1(i))./2)).^2;
7             dist(i,j)=2.*r.*1000.*asin(sqrt(A+(cos(phi1(i)).*cos(phi2(j)).*B)
);
     end
9     end
end

```

M.2. Códigos Matlab específicos para Antofagasta

```

clc
2 clear all
format long
4
r=6351; %Radio de la tierra en kilometros
6
%Parametros de alturas de los nodos
8
Hk0=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',2,'F3:F11');
10
Hj01=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',3,'F3:F6');
12
Hj02=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',3,'F7:F8');
14
Hi0=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',7,'G3:G11');
16
Hi1=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',8,'G3:G12');
18
Hi2=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',9,'G3:G6');

```

```

20 Hj1=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',4,'F3:F7');
22 Hk1=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',5,'F3:F22');
24 Hk2=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',6,'F3:F25');
26 Hk3=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',13,'G3');
28 Hk4=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',13,'G4');
30 Hk5=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',13,'G5:G13');
32 Hnd01=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',10,'F3:F4');
34 Hnd02=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',10,'F5:F7');
36 Hnd03=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',10,'F8:F10');
38 Hnw=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',11,'F3:F5');
40 Hmw=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',12,'F3:F7');
42
44
46 %Calculo de DH por tabla
DH1= DeltaH(Hk0,Hi2);
48 DH2= DeltaH(Hk0,Hj01);
DH3= DeltaH(Hk0,Hnd01);
50
DH4= DeltaH(Hk4,Hj02);
52 DH5= DeltaH(Hk4,Hnd02);
54 DH6= DeltaH(Hk5,Hk0);
DH7= DeltaH(Hk5,Hnd03);
56
DH8= DeltaH(Hj01,Hi1);
58 DH9= DeltaH(Hj01,Hi0);
DH10= DeltaH(Hj01,Hi2);
60 DH11= DeltaH(Hj01,Hk1);
62 DH12= DeltaH(Hj02,Hi1);
DH13= DeltaH(Hj02,Hi0);
64 DH14= DeltaH(Hj02,Hi2);
DH15= DeltaH(Hj02,Hk1);
66
DH16= DeltaH(Hnd01,Hi1);
68 DH17= DeltaH(Hnd01,Hi0);
DH18= DeltaH(Hnd01,Hi2);
70 DH19= DeltaH(Hnd01,Hk1);
72 DH20= DeltaH(Hnd02,Hi1);
DH21= DeltaH(Hnd02,Hi0);
74 DH22= DeltaH(Hnd02,Hi2);
DH23= DeltaH(Hnd02,Hk1);

```

```

76 DH24= DeltaH (Hnd03 , Hi1 ) ;
78 DH25= DeltaH (Hnd03 , Hi0 ) ;
DH26= DeltaH (Hnd03 , Hi2 ) ;
80 DH27= DeltaH (Hnd03 , Hk1 ) ;

82 DH28= DeltaH (Hk1 , Hi1 ) ;
DH29= DeltaH (Hk1 , Hi0 ) ;
84 DH30= DeltaH (Hk1 , Hi2 ) ;

86 DH31= DeltaH (Hi1 , Hk2 ) ;
DH32= DeltaH (Hi0 , Hk2 ) ;

88
DH33= DeltaH (Hi1 , Hj1 ) ;
90 DH34= DeltaH (Hi0 , Hj1 ) ;
DH35= DeltaH (Hk2 , Hj1 ) ;

92
DH36= DeltaH (Hi1 , Hnw ) ;
94 DH37= DeltaH (Hi0 , Hnw ) ;
DH38= DeltaH (Hk2 , Hnw ) ;

96
DH39= DeltaH (Hi1 , Hmw ) ;
98 DH40= DeltaH (Hi0 , Hmw ) ;
DH41= DeltaH (Hk2 , Hmw ) ;

100
DH42= DeltaH (Hj1 , Hk0 ) ;
102 DH43= DeltaH (Hi2 , Hk0 ) ;

104 DH44= DeltaH (Hnw , Hk1 ) ;
DH45= DeltaH (Hnw , Hi1 ) ;
106 DH46= DeltaH (Hnw , Hi2 ) ;
DH47= DeltaH (Hnw , Hi0 ) ;

108
DH48= DeltaH (Hmw , Hk1 ) ;
110 DH49= DeltaH (Hmw , Hi1 ) ;
DH50= DeltaH (Hmw , Hi2 ) ;
112 DH51= DeltaH (Hmw , Hi0 ) ;

114
%Escribir Diferencia de Alturas en excel
116 xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH1 , 1 , 'B2 ' )
xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH2 , 2 , 'B2 ' )
118 xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH3 , 3 , 'B2 ' )
xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH4 , 4 , 'B2 ' )
120 xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH5 , 5 , 'B2 ' )
xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH6 , 6 , 'B2 ' )
122 xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH7 , 7 , 'B2 ' )
xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH8 , 8 , 'B2 ' )
124 xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH9 , 9 , 'B2 ' )
xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH10 , 10 , 'B2 ' )
126 xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH11 , 11 , 'B2 ' )
xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH12 , 12 , 'B2 ' )
128 xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH13 , 13 , 'B2 ' )
xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH14 , 14 , 'B2 ' )
130 xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH15 , 15 , 'B2 ' )
xlswrite ( 'Tablas _ DAlturasAntof. xlsx ' , DH16 , 16 , 'B2 ' )

```

```

132 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH17,17,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH18,18,'B2')
134 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH19,19,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH20,20,'B2')
136 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH21,21,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH22,22,'B2')
138 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH23,23,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH24,24,'B2')
140 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH25,25,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH26,26,'B2')
142 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH27,27,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH28,28,'B2')
144 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH29,29,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH30,30,'B2')
146 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH31,31,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH32,32,'B2')
148 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH33,33,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH34,34,'B2')
150 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH35,35,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH36,36,'B2')
152 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH37,37,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH38,38,'B2')
154 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH39,39,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH40,40,'B2')
156 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH41,41,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH42,42,'B2')
158 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH43,43,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH44,44,'B2')
160 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH45,45,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH46,46,'B2')
162 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH47,47,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH48,48,'B2')
164 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH49,49,'B2')
    xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH50,50,'B2')
166 xlswrite('Tablas_DAlturasAntof.xlsx',DH51,51,'B2')

```

```

clc
2 clear all
format long
4 %phi corresponde a latitud , en radianes
  %lambda corresponde a longitud , en radianes
6
  %Constantes de la funcion
8 r=6351; %Radio de la tierra en kilometros
10
  %Parametros de latitud y longitud nodos
  phik0=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',2,'D3:D11');
12 lambdak0=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',2,'E3:E11');
14
  phij01=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',3,'D3:D6');
  lambdaj01=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',3,'E3:E6');
16
  phij02=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',3,'D7:D8');
18 lambdaj02=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',3,'E7:E8');
20
  phii0=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',7,'E3:E11');

```



```

78 Dist10= Distancia (phij01 , phii2 , lambdaj01 , lambdai2 , r );
Dist11= Distancia (phij01 , phik1 , lambdaj01 , lambdak1 , r );

80 Dist12= Distancia (phij02 , phii1 , lambdaj02 , lambdai1 , r );
Dist13= Distancia (phij02 , phii0 , lambdaj02 , lambdai0 , r );
82 Dist14= Distancia (phij02 , phii2 , lambdaj02 , lambdai2 , r );
Dist15= Distancia (phij02 , phik1 , lambdaj02 , lambdak1 , r );

84 Dist16= Distancia (phind01 , phii1 , lambdand01 , lambdai1 , r );
86 Dist17= Distancia (phind01 , phii0 , lambdand01 , lambdai0 , r );
Dist18= Distancia (phind01 , phii2 , lambdand01 , lambdai2 , r );
88 Dist19= Distancia (phind01 , phik1 , lambdand01 , lambdak1 , r );

90 Dist20= Distancia (phind02 , phii1 , lambdand02 , lambdai1 , r );
Dist21= Distancia (phind02 , phii0 , lambdand02 , lambdai0 , r );
92 Dist22= Distancia (phind02 , phii2 , lambdand02 , lambdai2 , r );
Dist23= Distancia (phind02 , phik1 , lambdand02 , lambdak1 , r );

94 Dist24= Distancia (phind03 , phii1 , lambdand03 , lambdai1 , r );
96 Dist25= Distancia (phind03 , phii0 , lambdand03 , lambdai0 , r );
Dist26= Distancia (phind03 , phii2 , lambdand03 , lambdai2 , r );
98 Dist27= Distancia (phind03 , phik1 , lambdand03 , lambdak1 , r );

100 Dist28= Distancia (phik1 , phii1 , lambdak1 , lambdai1 , r );
Dist29= Distancia (phik1 , phii0 , lambdak1 , lambdai0 , r );
102 Dist30= Distancia (phik1 , phii2 , lambdak1 , lambdai2 , r );

104 Dist31= Distancia (phii1 , phik2 , lambdai1 , lambdak2 , r );
Dist32= Distancia (phii0 , phik2 , lambdai0 , lambdak2 , r );

106 Dist33= Distancia (phii1 , phij1 , lambdai1 , lambdaj1 , r );
108 Dist34= Distancia (phii0 , phij1 , lambdai0 , lambdaj1 , r );
Dist35= Distancia (phik2 , phij1 , lambdak2 , lambdaj1 , r );

110 Dist36= Distancia (phii1 , phinw , lambdai1 , lambdanw , r );
112 Dist37= Distancia (phii0 , phinw , lambdai0 , lambdanw , r );
Dist38= Distancia (phik2 , phinw , lambdak2 , lambdanw , r );

114 Dist39= Distancia (phii1 , phimw , lambdai1 , lambdamw , r );
116 Dist40= Distancia (phii0 , phimw , lambdai0 , lambdamw , r );
Dist41= Distancia (phik2 , phimw , lambdak2 , lambdamw , r );

118 Dist42= Distancia (phij1 , phik0 , lambdaj1 , lambdak0 , r );
120 Dist43= Distancia (phii2 , phik0 , lambdai2 , lambdak0 , r );

122 Dist44= Distancia (phinw , phik1 , lambdanw , lambdak1 , r );
Dist45= Distancia (phinw , phii1 , lambdanw , lambdai1 , r );
124 Dist46= Distancia (phinw , phii2 , lambdanw , lambdai2 , r );
Dist47= Distancia (phinw , phii0 , lambdanw , lambdai0 , r );

126 Dist48= Distancia (phimw , phik1 , lambdamw , lambdak1 , r );
128 Dist49= Distancia (phimw , phii1 , lambdamw , lambdai1 , r );
Dist50= Distancia (phimw , phii2 , lambdamw , lambdai2 , r );
130 Dist51= Distancia (phimw , phii0 , lambdamw , lambdai0 , r );

132 %Escribir distancias en excel

```

```

134  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist1,1,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist2,2,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist3,3,'B2')
136  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist4,4,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist5,5,'B2')
138  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist6,6,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist7,7,'B2')
140  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist8,8,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist9,9,'B2')
142  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist10,10,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist11,11,'B2')
144  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist12,12,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist13,13,'B2')
146  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist14,14,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist15,15,'B2')
148  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist16,16,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist17,17,'B2')
150  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist18,18,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist19,19,'B2')
152  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist20,20,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist21,21,'B2')
154  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist22,22,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist23,23,'B2')
156  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist24,24,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist25,25,'B2')
158  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist26,26,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist27,27,'B2')
160  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist28,28,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist29,29,'B2')
162  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist30,30,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist31,31,'B2')
164  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist32,32,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist33,33,'B2')
166  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist34,34,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist35,35,'B2')
168  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist36,36,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist37,37,'B2')
170  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist38,38,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist39,39,'B2')
172  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist40,40,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist41,41,'B2')
174  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist42,42,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist43,43,'B2')
176  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist44,44,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist45,45,'B2')
178  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist46,46,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist47,47,'B2')
180  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist48,48,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist49,49,'B2')
182  xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist50,50,'B2')
    xlswrite('Tablas_distanciasAntof.xlsx',Dist51,51,'B2')

```

M.3. Códigos Matlab específicos para Atacama

1 `clc`

```

clear all
3 format long

5 r=6351; %Radio de la tierra en kilometros

7
9 %Parametros de alturas de los nodos
Hk0=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',2,'F3:F9');
11 Hj01=xlsread('Ubicaciones_Antof.xlsx',3,'F3:F7');
13 Hj02=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',3,'F8:F9');
15 Hi0=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',7,'G3:G16');
17 Hi1=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',8,'G3:G11');
19 Hi2=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',9,'G3:G16');
21 Hj1=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',4,'F3:F9');
23 Hk1=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',5,'F3:F37');
25 Hk2=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',6,'F3:F17');
27 Hk3=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',13,'G3');
29 Hk4=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',13,'G4');
31 Hk5=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',13,'G5:G16');
33 Hnd01=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',10,'F3:F4');
35 Hnd02=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',10,'F5:F7');
37 Hnd03=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',10,'F8:F10');
39 Hnw=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',11,'F3:F5');
41 Hmw=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',12,'F3:F9');
43
45
47 %Calculo de DH por tabla
DH1= DeltaH(Hk0,Hi2);
49 DH2= DeltaH(Hk0,Hj01);
DH3= DeltaH(Hk0,Hnd01);
51
DH4= DeltaH(Hk4,Hj02);
53 DH5= DeltaH(Hk4,Hnd02);
55
DH6= DeltaH(Hk5,Hk0);
DH7= DeltaH(Hk5,Hnd03);
57

```

DH8= DeltaH (Hj01 , Hi1) ;
 59 DH9= DeltaH (Hj01 , Hi0) ;
 DH10= DeltaH (Hj01 , Hi2) ;
 61 DH11= DeltaH (Hj01 , Hk1) ;

 63 DH12= DeltaH (Hj02 , Hi1) ;
 DH13= DeltaH (Hj02 , Hi0) ;
 65 DH14= DeltaH (Hj02 , Hi2) ;
 DH15= DeltaH (Hj02 , Hk1) ;
 67
 DH16= DeltaH (Hnd01 , Hi1) ;
 69 DH17= DeltaH (Hnd01 , Hi0) ;
 DH18= DeltaH (Hnd01 , Hi2) ;
 71 DH19= DeltaH (Hnd01 , Hk1) ;

 73 DH20= DeltaH (Hnd02 , Hi1) ;
 DH21= DeltaH (Hnd02 , Hi0) ;
 75 DH22= DeltaH (Hnd02 , Hi2) ;
 DH23= DeltaH (Hnd02 , Hk1) ;
 77
 DH24= DeltaH (Hnd03 , Hi1) ;
 79 DH25= DeltaH (Hnd03 , Hi0) ;
 DH26= DeltaH (Hnd03 , Hi2) ;
 81 DH27= DeltaH (Hnd03 , Hk1) ;

 83 DH28= DeltaH (Hk1 , Hi1) ;
 DH29= DeltaH (Hk1 , Hi0) ;
 85 DH30= DeltaH (Hk1 , Hi2) ;

 87 DH31= DeltaH (Hi1 , Hk2) ;
 DH32= DeltaH (Hi0 , Hk2) ;
 89
 DH33= DeltaH (Hi1 , Hj1) ;
 91 DH34= DeltaH (Hi0 , Hj1) ;
 DH35= DeltaH (Hk2 , Hj1) ;
 93
 DH36= DeltaH (Hi1 , Hnw) ;
 95 DH37= DeltaH (Hi0 , Hnw) ;
 DH38= DeltaH (Hk2 , Hnw) ;
 97
 DH39= DeltaH (Hi1 , Hmw) ;
 99 DH40= DeltaH (Hi0 , Hmw) ;
 DH41= DeltaH (Hk2 , Hmw) ;
 101
 DH42= DeltaH (Hj1 , Hk0) ;
 103 DH43= DeltaH (Hi2 , Hk0) ;

 105 DH44= DeltaH (Hnw , Hk1) ;
 DH45= DeltaH (Hnw , Hi1) ;
 107 DH46= DeltaH (Hnw , Hi2) ;
 DH47= DeltaH (Hnw , Hi0) ;
 109
 DH48= DeltaH (Hmw , Hk1) ;
 111 DH49= DeltaH (Hmw , Hi1) ;
 DH50= DeltaH (Hmw , Hi2) ;
 113 DH51= DeltaH (Hmw , Hi0) ;

```

115 %Escribir Diferencia de alturas en excel
117 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH1,1,'B2')
118 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH2,2,'B2')
119 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH3,3,'B2')
120 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH4,4,'B2')
121 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH5,5,'B2')
122 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH6,6,'B2')
123 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH7,7,'B2')
124 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH8,8,'B2')
125 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH9,9,'B2')
126 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH10,10,'B2')
127 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH11,11,'B2')
128 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH12,12,'B2')
129 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH13,13,'B2')
130 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH14,14,'B2')
131 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH15,15,'B2')
132 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH16,16,'B2')
133 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH17,17,'B2')
134 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH18,18,'B2')
135 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH19,19,'B2')
136 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH20,20,'B2')
137 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH21,21,'B2')
138 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH22,22,'B2')
139 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH23,23,'B2')
140 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH24,24,'B2')
141 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH25,25,'B2')
142 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH26,26,'B2')
143 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH27,27,'B2')
144 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH28,28,'B2')
145 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH29,29,'B2')
146 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH30,30,'B2')
147 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH31,31,'B2')
148 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH32,32,'B2')
149 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH33,33,'B2')
150 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH34,34,'B2')
151 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH35,35,'B2')
152 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH36,36,'B2')
153 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH37,37,'B2')
154 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH38,38,'B2')
155 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH39,39,'B2')
156 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH40,40,'B2')
157 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH41,41,'B2')
158 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH42,42,'B2')
159 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH43,43,'B2')
160 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH44,44,'B2')
161 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH45,45,'B2')
162 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH46,46,'B2')
163 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH47,47,'B2')
164 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH48,48,'B2')
165 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH49,49,'B2')
166 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH50,50,'B2')
167 xlswrite('Tablas_DAlturasAtac.xlsx',DH51,51,'B2')

```

```
1 clc
```

```

clear all
3 format long
  %phi corresponde a latitud
5  %lambda corresponde a longitud

7  %Constantes de la funcion
r=6351; %Radio de la tierra en kilometros

9
  %Parametros de latitud y longitud nodos
11 phik0=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',2,'D3:D9');
  lambdak0=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',2,'E3:E9');
13
  phij01=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',3,'D3:D7');
15  lambdaj01=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',3,'E3:E7');

17  phij02=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',3,'D8:D9');
  lambdaj02=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',3,'E8:E9');
19
  phii0=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',7,'E3:E16');
21  lambdai0=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',7,'F3:F16');

23  phii1=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',8,'E3:E11');
  lambdai1=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',8,'F3:F11');
25
  phii2=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',9,'E3:E16');
27  lambdai2=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',9,'F3:F16');

29  phij1=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',4,'D3:D9');
  lambdaj1=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',4,'E3:E9');
31
  phik1=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',5,'D3:D37');
33  lambdak1=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',5,'E3:E37');

35  phik2=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',6,'D3:D17');
  lambdak2=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',6,'E3:E17');
37
  phik3=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',13,'E3');
39  lambdak3=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',13,'F3');

41  phik4=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',13,'E4');
  lambdak4=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',13,'F4');
43
  phik5=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',13,'E5:E16');
45  lambdak5=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',13,'F5:F16');

47  phind01=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',10,'D3:D4');
  lambdand01=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',10,'E3:E4');
49
  phind02=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',10,'D5:D7');
51  lambdand02=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',10,'E5:E7');

53  phind03=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',10,'D8:D10');
  lambdand03=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',10,'E8:E10');
55
  phinw=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',11,'D3:D5');
57  lambdanw=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',11,'E3:E5');

```

```

59 phinw=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',12,'D3:D9');
   lambdamw=xlsread('Ubicaciones_Atac.xlsx',12,'E3:E9');
61
63
65 %Calculo de distancias por tabla
   Dist1= Distancia(phik0, phii2, lambdak0, lambdai2, r);
   Dist2= Distancia(phik0, phij01, lambdak0, lambdaj01, r);
67   Dist3= Distancia(phik0, phind01, lambdak0, lambdand01, r);
69   Dist4= Distancia(phik4, phij02, lambdak4, lambdaj02, r);
   Dist5= Distancia(phik4, phind02, lambdak4, lambdand02, r);
71
   Dist6= Distancia(phik5, phik0, lambdak5, lambdak0, r);
73   Dist7= Distancia(phik5, phind03, lambdak5, lambdand03, r);
75   Dist8= Distancia(phij01, phii1, lambdaj01, lambdai1, r);
   Dist9= Distancia(phij01, phii0, lambdaj01, lambdai0, r);
77   Dist10= Distancia(phij01, phii2, lambdaj01, lambdai2, r);
   Dist11= Distancia(phij01, phik1, lambdaj01, lambdak1, r);
79
   Dist12= Distancia(phij02, phii1, lambdaj02, lambdai1, r);
81   Dist13= Distancia(phij02, phii0, lambdaj02, lambdai0, r);
   Dist14= Distancia(phij02, phii2, lambdaj02, lambdai2, r);
83   Dist15= Distancia(phij02, phik1, lambdaj02, lambdak1, r);
85   Dist16= Distancia(phind01, phii1, lambdand01, lambdai1, r);
   Dist17= Distancia(phind01, phii0, lambdand01, lambdai0, r);
87   Dist18= Distancia(phind01, phii2, lambdand01, lambdai2, r);
   Dist19= Distancia(phind01, phik1, lambdand01, lambdak1, r);
89
   Dist20= Distancia(phind02, phii1, lambdand02, lambdai1, r);
91   Dist21= Distancia(phind02, phii0, lambdand02, lambdai0, r);
   Dist22= Distancia(phind02, phii2, lambdand02, lambdai2, r);
93   Dist23= Distancia(phind02, phik1, lambdand02, lambdak1, r);
95   Dist24= Distancia(phind03, phii1, lambdand03, lambdai1, r);
   Dist25= Distancia(phind03, phii0, lambdand03, lambdai0, r);
97   Dist26= Distancia(phind03, phii2, lambdand03, lambdai2, r);
   Dist27= Distancia(phind03, phik1, lambdand03, lambdak1, r);
99
   Dist28= Distancia(phik1, phii1, lambdak1, lambdai1, r);
101   Dist29= Distancia(phik1, phii0, lambdak1, lambdai0, r);
   Dist30= Distancia(phik1, phii2, lambdak1, lambdai2, r);
103
   Dist31= Distancia(phii1, phik2, lambdai1, lambdak2, r);
105   Dist32= Distancia(phii0, phik2, lambdai0, lambdak2, r);
107   Dist33= Distancia(phii1, phij1, lambdai1, lambdaj1, r);
   Dist34= Distancia(phii0, phij1, lambdai0, lambdaj1, r);
109   Dist35= Distancia(phik2, phij1, lambdak2, lambdaj1, r);
111   Dist36= Distancia(phii1, phinw, lambdai1, lambdanw, r);
   Dist37= Distancia(phii0, phinw, lambdai0, lambdanw, r);
113   Dist38= Distancia(phik2, phinw, lambdak2, lambdanw, r);

```

```

115 Dist39= Distancia(phii1 ,phimw ,lambdai1 ,lambdamw ,r );
Dist40= Distancia(phii0 ,phimw ,lambdai0 ,lambdamw ,r );
117 Dist41= Distancia(phik2 ,phimw ,lambdak2 ,lambdamw ,r );

119 Dist42= Distancia(phij1 ,phik0 ,lambdaj1 ,lambdak0 ,r );
Dist43= Distancia(phii2 ,phik0 ,lambdai2 ,lambdak0 ,r );

121
Dist44= Distancia(phinw ,phik1 ,lambdanw ,lambdak1 ,r );
123 Dist45= Distancia(phinw ,phii1 ,lambdanw ,lambdai1 ,r );
Dist46= Distancia(phinw ,phii2 ,lambdanw ,lambdai2 ,r );
125 Dist47= Distancia(phinw ,phii0 ,lambdanw ,lambdai0 ,r );

127 Dist48= Distancia(phimw ,phik1 ,lambdamw ,lambdak1 ,r );
Dist49= Distancia(phimw ,phii1 ,lambdamw ,lambdai1 ,r );
129 Dist50= Distancia(phimw ,phii2 ,lambdamw ,lambdai2 ,r );
Dist51= Distancia(phimw ,phii0 ,lambdamw ,lambdai0 ,r );

131
%Escribir distancias en excel
133 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist1,1,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist2,2,'B2')
135 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist3,3,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist4,4,'B2')
137 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist5,5,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist6,6,'B2')
139 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist7,7,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist8,8,'B2')
141 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist9,9,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist10,10,'B2')
143 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist11,11,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist12,12,'B2')
145 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist13,13,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist14,14,'B2')
147 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist15,15,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist16,16,'B2')
149 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist17,17,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist18,18,'B2')
151 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist19,19,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist20,20,'B2')
153 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist21,21,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist22,22,'B2')
155 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist23,23,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist24,24,'B2')
157 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist25,25,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist26,26,'B2')
159 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist27,27,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist28,28,'B2')
161 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist29,29,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist30,30,'B2')
163 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist31,31,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist32,32,'B2')
165 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist33,33,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist34,34,'B2')
167 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist35,35,'B2')
xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist36,36,'B2')
169 xlsxwrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist37,37,'B2')

```



```
171 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist38,38,'B2')
173 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist39,39,'B2')
175 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist40,40,'B2')
177 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist41,41,'B2')
179 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist42,42,'B2')
181 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist43,43,'B2')
183 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist44,44,'B2')
185 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist45,45,'B2')
187 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist46,46,'B2')
189 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist47,47,'B2')
191 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist48,48,'B2')
193 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist49,49,'B2')
195 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist50,50,'B2')
197 xlswrite('Tablas_distanciasAtac.xlsx',Dist51,51,'B2')
```

Anexo N

Indicador ambiental

El indicador ambiental dado por referencia está dado por la ecuación [85]:

$$WC = \frac{Hu'}{R} = \frac{Hu'}{P - ET_C} \quad (N.1)$$

El agua que sale (Hu') se encuentra en mm/año, mientras que la salida establecida en el balance de masa (Hu) se encuentra en m^3/s . Así, asumiendo que el caudal se encuentra en una fuente con forma cúbica (río), se puede establecer la siguiente relación:

$$1 \left[\frac{mm}{\text{año}} \right] \cdot \frac{1}{1000} \left[\frac{m}{mm} \right] \cdot \frac{1}{365} \left[\frac{\text{año}}{d} \right] \cdot \frac{1}{24} \left[\frac{d}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right] \cdot Area_{base} [m^2]$$

El área base se encuentra explicada en el Anexo I. Así se tiene que:

$$\frac{Hu' \left[\frac{mm}{\text{año}} \right]}{3,1536 \cdot 10^{10}} \cdot Area_{base} [m^2] = Hu \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Reemplazando lo anterior en el balance de masa dado por la ecuación 5.1, se tiene:

$$WC = \frac{H_u \cdot 3,1536 \cdot 10^{10}}{Area_{base} \cdot (P - Etc)}$$

$$WC = \frac{\left(\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} + \sum_{r \in R} F_{r,i} - \sum_{j \in DN_i} F_{i,j} - \sum_{s \in S} F_{i,s} \right) \cdot 3,1536 \cdot 10^{10}}{Area_{base} \cdot (P - Etc)}, \forall i \in \{FN\} \quad (N.2)$$

Pero P, corresponde a los ingresos desde precipitaciones, por lo que se puede hacer una relación con $F_{r,i}$. De forma análoga, Etc corresponden a las pérdidas por evapotranspiración, por lo que se puede establecer una relación con $F_{i,s}$. Estas relaciones se observan en las ecuaciones N.3 y N.4, donde *factoretc* corresponde al factor ponderador de las pérdidas por evapotranspiración, dentro de todas las pérdidas que pueden existir en una fuente de agua como filtración o consumo de agua por la fauna presente en el lugar.

$$\frac{P \left[\frac{mm}{año} \right]}{3,1532 \cdot 10^{10}} \cdot Area_{base}[m^2] = \sum_{r \in R} F_{r,i} \quad (N.3)$$

$$\frac{Etc \left[\frac{mm}{año} \right]}{3,1532 \cdot 10^{10}} \cdot Area_{base}[m^2] = factoretc \cdot \sum_{s \in S} F_{i,s} \quad (N.4)$$

Finalmente la ecuación para WC queda de la siguiente forma:

$$WC = \frac{\left(\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} + \sum_{r \in R} F_{r,i} - \sum_{j \in DN_i} F_{i,j} - \sum_{s \in S} F_{i,s} \right) \cdot 3,1536 \cdot 10^{10}}{Area_{base} \cdot \left(\frac{3,1532 \cdot 10^{10} \cdot \sum_{r \in R} F_{r,i}}{Area_{base}} - \frac{3,1536 \cdot 10^{10} \cdot factoretc \cdot \sum_{s \in S} F_{i,s}}{Area_{base}} \right)}, \forall i \in \{FN\}$$

$$WC = \left(\frac{\sum_{p \in ON_i} F_{p,i} + \sum_{r \in R} F_{r,i} - \sum_{j \in DN_i} F_{i,j} - \sum_{s \in S} F_{i,s}}{\sum_{r \in R} F_{r,i} - factoretc \cdot \sum_{s \in S} F_{i,s}} \right), \forall i \in \{FN\} \quad (N.5)$$

Anexo Ñ

Resultados de programación

Los códigos entregan resultados en formato .gms, .gdx y .xlsx. Los archivos Excel son los más amigables para el tratamiento de datos. En los siguientes link se adjuntan los resultados:

- Valores ideales y anti-ideales y creación de curva de Pareto para ambos escenarios de Antofagasta: <https://bit.ly/2Mp0tdR>
- Balance de masa de solución optimizada para importancias relativas del 50% en el escenario 1 de Antofagasta: <https://bit.ly/3cuKzsT>
- Balance de masa de solución optimizada para importancias relativas del 50% en el escenario 2 de Antofagasta: <https://bit.ly/2ACkBXj>
- Valores ideales y anti-ideales y creación de curva de Pareto para ambos escenarios de Atacama: <https://bit.ly/3gP5j1T>
- Balance de masa de solución optimizada para importancias relativas del 50% en el escenario 1 de Atacama: <https://bit.ly/30a3Vkv>
- Balance de masa de solución optimizada para importancias relativas del 50% en el escenario 2 de Atacama: <https://bit.ly/2A0sx4r>

Los archivos que contienen los balances de masa, en la primera hoja presentan el resumen, y en las siguientes hojas presentan diferentes flujo divididos mediante matrices. Estas matrices sigue la misma lógica de nombre de los flujos, por ejemplo, si un flujo es F1, entonces la matriz corresponde a M1.

Anexo O

Códigos de programación

O.1. Antofagasta

El siguiente código es para el problema multi-objetivo de la región de Antofagasta, escrito en GAMS. Para obtener los mono objetivos se debe cambiar la función a minimizar, en el caso de los valores ideales, o maximizar, en el caso de los valores anti ideales.

```
1 $ONTEXT
3 El siguiente codigo corresponde a la resolucion del problema de Redes de Agua
   para la region de Antofagasta , Chile .
5 Codigo de Daniela Gormaz Cuevas para su proyecto de Tesis de Ingeniera Civil
   Quimica
7 $OFFTEXT
   *****
9 Sets
   BSE origen de flujo subterraneo /Or/
11   K0 fuente natural /RL1, RL2, RL3, RL4, RL5, RS1, RSP1, RV1, SUB/
   J0 planta de potabilizacion PTAP-DWIP /EP1_AACT, EP1_AASGB, EP1_AASC,
   EP1_AAOH, EP2_AALC, EP2_AATT/
13   set J01(J0) subset PTAP para fuente natural /EP1_AACT,
   EP1_AASGB, EP1_AASC, EP1_AAOH/
   set J02(J0) subset PTAP desalinizacion /EP2_AALC, EP2_AATT/
15   I0 consumo domiciliario /CDTC1, CDEL1, CDEL2, CDEL3, CDAF1, CDAF2,
   CDAF3, CDAF4, CDAF5/
   I1 consumo industrial /CITC1, CIHOS, CMTC1, CIEL1, CIMALLCL, CMEL1,
   CMEL2, CIAF1, CIJMB, CMAF1/
17   I2 consumo agricola /CREL1, CREL2, CRTC1, CRAF1/
   J1 planta de tratamiento de agua servida /EW_TC, EW_AASG, EW_AAB,
   EW_AALA, EW_ESPC/
19   K1 distribucion /D_TC, PEAP10293, D_EL, PEAP10894, PEAP10302,
   PEAP10305, PEAP10292, PEAP10294, PEAP10893, PEAP10303, PEAP10896, PEAP10310
   , PEAP10304, PEAP10306, PEAP10295, 303_PEAP10303, 303_PEAP10302, 303
   _PEAP10301, 303_PEAP10300, D_AF/
   K2 recoleccion /PEAS10322, PEAS10323, PEAS10324, PEAS10320, PEAS10319
   , R_TC, R_EL, PEAS10332, PEAS10313, PEAS10308, PEAS10309, PEAS10310,
```

```

21 PEAS10311, PEAS10312, PEAS10328, PEAS10315, PEAS10307, PEAS10314, PEAS10317
, PEAS10318, PEAS10868, PEAS10325, R_AF/
22     K3 sumidero /S/
23     K4 fuente ficticia que representa el mar /MR/
24     K5 fuente ficticia que representa la lluvia /LLL5, LLS1, LLSP1, LLV1,
TCQ4, CUPO, TCQ1, RGR, ET/
25     ND0 nueva planta de potabilizacion /NP1_TC, NP2_TC, NP3_TC, NP1_EL,
NP2_EL, NP3_EL, NP2_AF, NP3_AF/
26         set ND01(ND0) subset PTAP para fuente natural /NP1_TC, NP1_EL
/
27         set ND02(ND0) subset PTAP para desalination /NP2_TC, NP2_EL,
NP2_AF/
28         set ND03(ND0) subset PTAP para tratamiento de agua lluvia /
NP3_TC, NP3_EL, NP3_AF/
29     NW nueva planta de tratamiento de agua servida con calidad de salida
de agua potable /NW_TC, NW_EL, NW_AF/
30     MW planta de tratamiento de agua servida modificada con calidad de
salida de agua potable /MW_TC, MW_AASG, MW_AAB, MW_AALA, MW_ESPC/
*     RS puntos de medicion de lluvia fuera de fuentes naturales
seleccionadas, fuente ficticia de lluvia /TCQ4, CUPO, TCQ1, RGR, ET/
31 ;
*****
32 Parameters
33     M big M /1000000/
34     mm litle M /0.02/
35     BHum /0.3/
36     g gravedad [m-s] /9.8/
37     T tiempo anual de operacion [h+U+FFD]/8760/
38     E costo operacional [USD-kWh] /0.104/
39     w1 peso de la funcion AMB /0.5/
40     w2 peso de la funcion TC /0.5/
41
42
43 *Parametros asociados con las demandas de los nodos
44     DDA0(I0) tabla con demandas de consumo domiciliario
45         /CDTC1 0.060
46     CDEL1 0.324
47     CDEL2 0.002
48     CDEL3 0.022
49     CDAF1 0.026
50     CDAF2 0.712
51     CDAF3 0.026
52     CDAF4 0.002
53     CDAF5 0.018/
54     DDA1(I1) tabla con demandas de consumo industrial
55         /CITC1 0.00000417
56     CIHOS 0.000898
57     CMTC1 0.761333
58     CIEL1 0.0169
59     CIMALLCL 0.00376
60     CMEL1 1.5226666
61     CMEL2 1.142
62     CIAF1 0.08
63     CIJMB 0.0113
64     CMAF1 2.284/
65     DDA2(I2) tabla con demandas de consumo agricola

```

67 /CREL1 0.6966
69 CREL2 0.3341
71 CRTC1 0.0072
73 CRAF1 0.000607/
75 *Parametros asociados con las perdidas de agua
77 WLK0(K0) fraccion de perdida para fuente natural
79 /RL1 0.2
81 RL2 0.2
83 RL3 0.2
85 RL4 0.2
87 RL5 0.2
89 RS1 0.2
91 RSP1 0.2
93 RV1 0.2/
95 WLJ01(J01) fraccion de perdida para planta de potabilizacion de
97 fuente natural
99 /EP1_AACT 0.1
101 EP1_AASGB 0.1
103 EP1_AASC 0.1
105 EP1_AAOH 0.1/
107 WLJ02(J02) ffraccion de perdida para planta de potabilizacion de
109 desalinizacion
111 /EP2_AALC 0.1
113 EP2_AATT 0.1/
115 WLI0(I0) fraccion de perdida para consumo domiciliario
117 /CDTC1 0.1
119 CDEL1 0.1
CDEL2 0.1
CDEL3 0.1
CDAF1 0.1
CDAF2 0.1
CDAF3 0.1
CDAF4 0.1
CDAF5 0.1/
WLI1(I1) fraccion de perdida para consumo industrial
/CITC1 0.2
CIHOS 0.2
CMTC1 0.2
CIEL1 0.2
CIMALLCL 0.2
CMEL1 0.2
CMEL2 0.2
CIAF1 0.2
CIJMB 0.2
CMAF1 0.2/
WLI2(I2) fraccion de perdida para consumo agricola
/CREL1 0.5
CREL2 0.5
CRTC1 0.5

```

121      CRAF1 0.5/
123      WLJ1(J1) fraccion de perdida para planta de tratamiento de agua
servidas
      /EW_TC 0.1
125      EW_AASG 0.1
      EW_AAB 0.1
127      EW_AALA 0.1
      EW_ESPC 0.1/
129
      WLK1(K1) fraccion de perdida para distribucion
131      /D_TC 0.2
      PEAP10293 0.2
133      D_EL 0.2
      PEAP10894 0.2
135      PEAP10302 0.2
      PEAP10305 0.2
137      PEAP10292 0.2
      PEAP10294 0.2
139      PEAP10893 0.2
      PEAP10303 0.2
141      PEAP10896 0.2
      PEAP10310 0.2
143      PEAP10304 0.2
      PEAP10306 0.2
145      PEAP10295 0.2
      303_PEAP10303 0.2
147      303_PEAP10302 0.2
      303_PEAP10301 0.2
149      303_PEAP10300 0.2
      D_AF 0.2/
151
      WLK2(K2) fraccion de perdida para recoleccion
153      /PEAS10322 0.15
      PEAS10323 0.15
155      PEAS10324 0.15
      PEAS10320 0.15
157      PEAS10319 0.15
      R_TC 0.15
159      R_EL 0.15
      PEAS10332 0.15
161      PEAS10313 0.15
      PEAS10308 0.15
163      PEAS10309 0.15
      PEAS10310 0.15
165      PEAS10311 0.15
      PEAS10312 0.15
167      PEAS10328 0.15
      PEAS10315 0.15
169      PEAS10307 0.15
      PEAS10314 0.15
171      PEAS10317 0.15
      PEAS10318 0.15
173      PEAS10868 0.15
      PEAS10325 0.15
175      R_AF 0.15/

```


177 WLND01(ND01) fraccion de perdida para planta de potabilizacion nuevas
de fuente natural
/NP1_TC 0.1
179 NP1_EL 0.1/

181 WLND02(ND02) fraccion de perdida para planta de potabilizacion nueva
de desalinizacion
/NP2_TC 0.1
183 NP2_EL 0.1
NP2_AF 0.1/

185 WLND03(ND03) fraccion de perdida para planta de potabilizacion nueva
de aguas lluvias
/NP3_TC 0.1
187 NP3_EL 0.1
189 NP3_AF 0.1/

191 WLNW(NW) fraccion de perdida para planta de tratamiento de agua
servida nueva
/NW_TC 0.1
193 NW_EL 0.1
NW_AF 0.1/

195 WLMW(MW) fraccion de perdida para planta de tratamiento de agua
servida modificada
/MW_TC 0.1
197 MW_AASG 0.1
199 MW_AAB 0.1
MW_AALA 0.1
201 MW_ESPC 0.1/

203 *Parametros asociados con el flujo actual de tratamiento de las plantas [m3/s]

205 AFJ01(J01) flujo actual de planta de potabilizacion de fuente natural
/EP1_AACT 0.56
207 EP1_AASGB 0.02
EP1_AASC 1.12
209 EP1_AAOH 0.03/

211 AFJ02(J02) flujo actual de planta de potabilizacion para
desalinizacion
/EP2_AALC 0.03
213 EP2_AATT 0.006/

215 AFJ1(J1) flujo actual de planta de tratamiento de agua servidas
/EW_TC 0.36
217 EW_AASG 0.016
EW_AAB 0.002
219 EW_AALA 0.62
EW_ESPC 0.03/

221 AFMW(MW) flujo actual de planta de tratamiento de agua servidas
modificadas
/MW_TC 0.36
223 MW_AASG 0.016

```

225     MW_AAB 0.002
226     MW_AALA 0.62
227     MW_ESPC 0.03/

229 *Parmetros asociados con terreno
      TerrND01(ND01) Terreno para nuevas PTAP convencional [USD4(U+FFFD)]
231     /NP1_TC 551925
      NP1_EL 376275/

233
      TerrND02(ND02) Terreno para nuevas PTAP desalinizadoras [USD4(U+FFFD)]
235     /NP2_TC 919875
      NP2_EL 627125
237     NP2_AF 1212500/

239     TerrND03(ND03) Terreno para nuevas PTAP tratamiento de aguas lluvias
[USD4(U+FFFD)]
      /NP3_TC 551925
241     NP3_EL 376275
      NP3_AF 727500/

243
      TerrNW(NW) Terreno para nuevas PTAS calidad potable [USD4(U+FFFD)]
245     /NW_TC 1471800
      NW_EL 1003400
247     NW_AF 1940000/

249
;

251 Parameter DH1(K0,I2)
253 $call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH1 rng=DH1(K0,I2)!A1:E10 output =
      DH1.gdx
$GDXIN DH1.gdx
255 $LOAD DH1
$GDXIN

257 Parameter DH2(K0,J01)
259 $call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH2 rng=DH2(K0,J01)!A1:E10 output =
      DH2.gdx
$GDXIN DH2.gdx
261 $LOAD DH2
$GDXIN

263 Parameter DH3(K0,ND01)
265 $call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH3 rng=DH3(K0,ND01)!A1:C10 output
      =DH3.gdx
$GDXIN DH3.gdx
267 $LOAD DH3
$GDXIN

269 Parameter DH4(K4,J02)
271 $call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH4 rng=DH4(K4,J02)!A1:C2 output =
      DH4.gdx
$GDXIN DH4.gdx
273 $LOAD DH4
$GDXIN

275

```

```

277 Parameter DH5(K4,ND02)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH5 rng=DH5(K4,ND02)!A1:D2 output =
    DH5.gdx
$GDXIN DH5.gdx
279 $LOAD DH5
$GDXIN
281
283 Parameter DH6(K5,K0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH6 rng=DH6(K5,K0)!A1:D10 output =
    DH6.gdx
$GDXIN DH6.gdx
285 $LOAD DH6
$GDXIN
287
289 Parameter DH7(K5,ND03)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH7 rng=DH7(K5,ND03)!A1:D10 output
    =DH7.gdx
$GDXIN DH7.gdx
291 $LOAD DH7
$GDXIN
293
295 Parameter DH8(J01,I1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH8 rng=DH8(J01,I1)!A1:K5 output =
    DH8.gdx
$GDXIN DH8.gdx
297 $LOAD DH8
$GDXIN
299
301 Parameter DH9(J01,I0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH9 rng=DH9(J01,I0)!A1:J5 output =
    DH9.gdx
$GDXIN DH9.gdx
303 $LOAD DH9
$GDXIN
305
307 Parameter DH10(J01,I2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH10 rng=DH10(J01,I2)!A1:E5 output
    =DH10.gdx
$GDXIN DH10.gdx
309 $LOAD DH10
$GDXIN
311
313 Parameter DH11(J01,K1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH11 rng=DH11(J01,K1)!A1:U5 output
    =DH11.gdx
$GDXIN DH11.gdx
315 $LOAD DH11
$GDXIN
317
319 Parameter DH12(J02,I1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH12 rng=DH12(J02,I1)!A1:K3 output
    =DH12.gdx
$GDXIN DH12.gdx
321 $LOAD DH12
$GDXIN
323

```

```

325 Parameter DH13(J02 ,I0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH13 rng=DH13(J02 ,I0)!A1:J3 output
=DH13.gdx
$GDXIN DH13.gdx
327 $LOAD DH13
$GDXIN
329
331 Parameter DH14(J02 ,I2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH14 rng=DH14(J02 ,I2)!A1:E3 output
=DH14.gdx
$GDXIN DH14.gdx
333 $LOAD DH14
$GDXIN
335
337 Parameter DH15(J02 ,K1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH15 rng=DH15(J02 ,K1)!A1:U3 output
=DH15.gdx
$GDXIN DH15.gdx
339 $LOAD DH15
$GDXIN
341
343 Parameter DH16(ND01,I1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH16 rng=DH16(ND01,I1)!A1:K3 output
=DH16.gdx
$GDXIN DH16.gdx
345 $LOAD DH16
$GDXIN
347
349 Parameter DH17(ND01,I0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH17 rng=DH17(ND01,I0)!A1:J3 output
=DH17.gdx
$GDXIN DH17.gdx
351 $LOAD DH17
$GDXIN
353
355 Parameter DH18(ND01,I2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH18 rng=DH18(ND01,I2)!A1:E3 output
=DH18.gdx
$GDXIN DH18.gdx
357 $LOAD DH18
$GDXIN
359
361 Parameter DH19(ND01,K1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH19 rng=DH19(ND01,K1)!A1:U3 output
=DH19.gdx
$GDXIN DH19.gdx
363 $LOAD DH19
$GDXIN
365
367 Parameter DH20(ND02,I1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH20 rng=DH20(ND02,I1)!A1:K4 output
=DH20.gdx
$GDXIN DH20.gdx
369 $LOAD DH20
$GDXIN
371

```

```

373 Parameter DH21(ND02,I0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH21 rng=DH21(ND02,I0)!A1:J4 output
=DH21.gdx
$GDXIN DH21.gdx
375 $LOAD DH21
$GDXIN
377
379 Parameter DH22(ND02,I2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH22 rng=DH22(ND02,I2)!A1:E4 output
=DH22.gdx
$GDXIN DH22.gdx
381 $LOAD DH22
$GDXIN
383
385 Parameter DH23(ND02,K1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH23 rng=DH23(ND02,K1)!A1:U4 output
=DH23.gdx
$GDXIN DH23.gdx
387 $LOAD DH23
$GDXIN
389
391 Parameter DH24(ND03,I1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH24 rng=DH24(ND03,I1)!A1:K4 output
=DH24.gdx
$GDXIN DH24.gdx
393 $LOAD DH24
$GDXIN
395
397 Parameter DH25(ND03,I0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH25 rng=DH25(ND03,I0)!A1:J4 output
=DH25.gdx
$GDXIN DH25.gdx
399 $LOAD DH25
$GDXIN
401
403 Parameter DH26(ND03,I2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH26 rng=DH26(ND03,I2)!A1:E4 output
=DH26.gdx
$GDXIN DH26.gdx
405 $LOAD DH26
$GDXIN
407
409 Parameter DH27(ND03,K1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH27 rng=DH27(ND03,K1)!A1:U4 output
=DH27.gdx
$GDXIN DH27.gdx
411 $LOAD DH27
$GDXIN
413
415 Parameter DH28(K1,I1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH28 rng=DH28(K1,I1)!A1:K21 output
=DH28.gdx
$GDXIN DH28.gdx
417 $LOAD DH28
$GDXIN
419

```

```

421 Parameter DH29(K1,I0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH29 rng=DH29(K1,I0)!A1:J21 output
=DH29.gdx
$GDXIN DH29.gdx
423 $LOAD DH29
$GDXIN
425
427 Parameter DH30(K1,I2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH30 rng=DH30(K1,I2)!A1:E21 output
=DH30.gdx
$GDXIN DH30.gdx
429 $LOAD DH30
$GDXIN
431
433 Parameter DH31(I1,K2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH31 rng=DH31(I1,K2)!A1:X11 output
=DH31.gdx
$GDXIN DH31.gdx
435 $LOAD DH31
$GDXIN
437
439 Parameter DH32(I0,K2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH32 rng=DH32(I0,K2)!A1:X10 output
=DH32.gdx
$GDXIN DH32.gdx
441 $LOAD DH32
$GDXIN
443
445 Parameter DH33(I1,J1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH33 rng=DH33(I1,J1)!A1:F11 output
=DH33.gdx
$GDXIN DH33.gdx
447 $LOAD DH33
$GDXIN
449
451 Parameter DH34(I0,J1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH34 rng=DH34(I0,J1)!A1:F10 output
=DH34.gdx
$GDXIN DH34.gdx
453 $LOAD DH34
$GDXIN
455
457 Parameter DH35(K2,J1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH35 rng=DH35(K2,J1)!A1:F24 output
=DH35.gdx
$GDXIN DH35.gdx
459 $LOAD DH35
$GDXIN
461
463 Parameter DH36(I1,NW)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH36 rng=DH36(I1,NW)!A1:D11 output
=DH36.gdx
$GDXIN DH36.gdx
465 $LOAD DH36
$GDXIN
467

```

```

469 Parameter DH37(I0 ,NW)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH37 rng=DH37(I0 ,NW)!A1:D10 output
=DH37.gdx
$GDXIN DH37.gdx
471 $LOAD DH37
$GDXIN
473
475 Parameter DH38(K2 ,NW)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH38 rng=DH38(K2 ,NW)!A1:D24 output
=DH38.gdx
$GDXIN DH38.gdx
477 $LOAD DH38
$GDXIN
479
481 Parameter DH39(I1 ,MW)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH39 rng=DH1(K0 ,I2)!A1:F11 output =
DH39.gdx
$GDXIN DH39.gdx
483 $LOAD DH39
$GDXIN
485
487 Parameter DH40(I0 ,MW)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH40 rng=DH40(I0 ,MW)!A1:F10 output
=DH40.gdx
$GDXIN DH40.gdx
489 $LOAD DH40
$GDXIN
491
493 Parameter DH41(K2 ,MW)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH41 rng=DH41(K2 ,MW)!A1:F24 output
=DH41.gdx
$GDXIN DH41.gdx
495 $LOAD DH41
$GDXIN
497
499 Parameter DH42(J1 ,K0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH42 rng=DH42(J1 ,K0)!A1:J6 output =
DH42.gdx
$GDXIN DH42.gdx
501 $LOAD DH42
$GDXIN
503
505 Parameter DH43(I2 ,K0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH43 rng=DH43(I2 ,K0)!A1:J5 output =
DH43.gdx
$GDXIN DH43.gdx
507 $LOAD DH43
$GDXIN
509
511 Parameter DH44(NW ,K1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH44 rng=DH44(NW ,K1)!A1:U4 output =
DH44.gdx
$GDXIN DH44.gdx
513 $LOAD DH44
$GDXIN
515

```

```

517 Parameter DH45(NW, I1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH45 rng=DH45(NW, I1)!A1:K4 output =
    DH45.gdx
$GDXIN DH45.gdx
519 $LOAD DH45
$GDXIN
521
523 Parameter DH46(NW, I2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH46 rng=DH46(NW, I2)!A1:E4 output =
    DH46.gdx
$GDXIN DH46.gdx
525 $LOAD DH46
$GDXIN
527
529 Parameter DH47(NW, I0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH47 rng=DH47(NW, I0)!A1:J4 output =
    DH47.gdx
$GDXIN DH47.gdx
531 $LOAD DH47
$GDXIN
533
535 Parameter DH48(MW, K1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH48 rng=DH48(MW, K1)!A1:U6 output =
    DH48.gdx
$GDXIN DH48.gdx
537 $LOAD DH48
$GDXIN
539
541 Parameter DH49(MW, I1)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH49 rng=DH49(MW, I1)!A1:K6 output =
    DH49.gdx
$GDXIN DH49.gdx
543 $LOAD DH49
$GDXIN
545
547 Parameter DH50(MW, I2)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH50 rng=DH50(MW, I2)!A1:E6 output =
    DH50.gdx
$GDXIN DH50.gdx
549 $LOAD DH50
$GDXIN
551
553 Parameter DH51(MW, I0)
$call GDXXRW Tablas_Alturas_Antof.xlsx par=DH51 rng=DH51(MW, I0)!A1:J6 output =
    DH51.gdx
$GDXIN DH51.gdx
555 $LOAD DH51
$GDXIN
557
559
561 Parameter DIST1(K0, I2)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST1 rng=DIST1(K0, I2)!A1:E10
    output =DIST1.gdx
563 $GDXIN DIST1.gdx

```



```

$LOAD DIST1
565 $GDXIN

567 Parameter DIST2(K0,J01)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST2 rng=DIST2(K0,J01)!A1:E10
output =DIST2.gdx
569 $GDXIN DIST2.gdx
$LOAD DIST2
571 $GDXIN

573 Parameter DIST3(K0,ND01)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST3 rng=DIST3(K0,ND01)!A1:C10
output =DIST3.gdx
575 $GDXIN DIST3.gdx
$LOAD DIST3
577 $GDXIN

579 Parameter DIST4(K4,J02)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST4 rng=DIST4(K4,J02)!A1:C2
output =DIST4.gdx
581 $GDXIN DIST4.gdx
$LOAD DIST4
583 $GDXIN

585 Parameter DIST5(K4,ND02)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST5 rng=DIST5(K4,ND02)!A1:D2
output =DIST5.gdx
587 $GDXIN DIST5.gdx
$LOAD DIST5
589 $GDXIN

591 Parameter DIST6(K5,K0)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST6 rng=DIST6(K5,K0)!A1:D10
output =DIST6.gdx
593 $GDXIN DIST6.gdx
$LOAD DIST6
595 $GDXIN

597 Parameter DIST7(K5,ND03)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST7 rng=DIST7(K5,ND03)!A1:D10
output =DIST7.gdx
599 $GDXIN DIST7.gdx
$LOAD DIST7
601 $GDXIN

603 Parameter DIST8(J01,I1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST8 rng=DIST8(J01,I1)!A1:K5
output =DIST8.gdx
605 $GDXIN DIST8.gdx
$LOAD DIST8
607 $GDXIN

609 Parameter DIST9(J01,I0)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST9 rng=DIST9(J01,I0)!A1:J5
output =DIST9.gdx
611 $GDXIN DIST9.gdx

```

```

$LOAD DIST9
613 $GDXIN

615 Parameter DIST10(J01,I2)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST10 rng=DIST10(J01,I2)!A1:E5
output =DIST10.gdx
617 $GDXIN DIST10.gdx
$LOAD DIST10
619 $GDXIN

621 Parameter DIST11(J01,K1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST11 rng=DIST11(J01,K1)!A1:U5
output =DIST11.gdx
623 $GDXIN DIST11.gdx
$LOAD DIST11
625 $GDXIN

627 Parameter DIST12(J02,I1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST12 rng=DIST12(J02,I1)!A1:K3
output =DIST12.gdx
629 $GDXIN DIST12.gdx
$LOAD DIST12
631 $GDXIN

633 Parameter DIST13(J02,I0)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST13 rng=DIST13(J02,I0)!A1:J3
output =DIST13.gdx
635 $GDXIN DIST13.gdx
$LOAD DIST13
637 $GDXIN

639 Parameter DIST14(J02,I2)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST14 rng=DIST14(J02,I2)!A1:E3
output =DIST14.gdx
641 $GDXIN DIST14.gdx
$LOAD DIST14
643 $GDXIN

645 Parameter DIST15(J02,K1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST15 rng=DIST15(J02,K1)!A1:U3
output =DIST15.gdx
647 $GDXIN DIST15.gdx
$LOAD DIST15
649 $GDXIN

651 Parameter DIST16(ND01,I1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST16 rng=DIST16(ND01,I1)!A1:K3
output =DIST16.gdx
653 $GDXIN DIST16.gdx
$LOAD DIST16
655 $GDXIN

657 Parameter DIST17(ND01,I0)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST17 rng=DIST17(ND01,I0)!A1:J3
output =DIST17.gdx
659 $GDXIN DIST17.gdx

```

```

$LOAD DIST17
661 $GDXIN

663 Parameter DIST18(ND01,I2)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST18 rng=DIST18(ND01,I2)!A1:E3
output =DIST18.gdx
665 $GDXIN DIST18.gdx
$LOAD DIST18
667 $GDXIN

669 Parameter DIST19(ND01,K1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST19 rng=DIST19(ND01,K1)!A1:U3
output =DIST19.gdx
671 $GDXIN DIST19.gdx
$LOAD DIST19
673 $GDXIN

675 Parameter DIST20(ND02,I1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST20 rng=DIST20(ND02,I1)!A1:K4
output =DIST20.gdx
677 $GDXIN DIST20.gdx
$LOAD DIST20
679 $GDXIN

681 Parameter DIST21(ND02,I0)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST21 rng=DIST21(ND02,I0)!A1:J4
output =DIST21.gdx
683 $GDXIN DIST21.gdx
$LOAD DIST21
685 $GDXIN

687 Parameter DIST22(ND02,I2)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST22 rng=DIST22(ND02,I2)!A1:E4
output =DIST22.gdx
689 $GDXIN DIST22.gdx
$LOAD DIST22
691 $GDXIN

693 Parameter DIST23(ND02,K1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST23 rng=DIST23(ND02,K1)!A1:U4
output =DIST23.gdx
695 $GDXIN DIST23.gdx
$LOAD DIST23
697 $GDXIN

699 Parameter DIST24(ND03,I1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST24 rng=DIST24(ND03,I1)!A1:K4
output =DIST24.gdx
701 $GDXIN DIST24.gdx
$LOAD DIST24
703 $GDXIN

705 Parameter DIST25(ND03,I0)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST25 rng=DIST25(ND03,I0)!A1:J4
output =DIST25.gdx
707 $GDXIN DIST25.gdx

```

```

709 $LOAD DIST25
709 $GDXIN

711 Parameter DIST26(ND03,I2)
711 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST26 rng=DIST26(ND03,I2)!A1:E4
711 output =DIST26.gdx
713 $GDXIN DIST26.gdx
713 $LOAD DIST26
715 $GDXIN

717 Parameter DIST27(ND03,K1)
717 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST27 rng=DIST27(ND03,K1)!A1:U4
717 output =DIST27.gdx
719 $GDXIN DIST27.gdx
719 $LOAD DIST27
721 $GDXIN

723 Parameter DIST28(K1,I1)
723 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST28 rng=DIST28(K1,I1)!A1:K21
723 output =DIST28.gdx
725 $GDXIN DIST28.gdx
725 $LOAD DIST28
727 $GDXIN

729 Parameter DIST29(K1,I0)
729 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST29 rng=DIST29(K1,I0)!A1:J21
729 output =DIST29.gdx
731 $GDXIN DIST29.gdx
731 $LOAD DIST29
733 $GDXIN

735 Parameter DIST30(K1,I2)
735 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST30 rng=DIST30(K1,I2)!A1:E21
735 output =DIST30.gdx
737 $GDXIN DIST30.gdx
737 $LOAD DIST30
739 $GDXIN

741 Parameter DIST31(I1,K2)
741 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST31 rng=DIST31(I1,K2)!A1:X11
741 output =DIST31.gdx
743 $GDXIN DIST31.gdx
743 $LOAD DIST31
745 $GDXIN

747 Parameter DIST32(I0,K2)
747 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST32 rng=DIST32(I0,K2)!A1:X10
747 output =DIST32.gdx
749 $GDXIN DIST32.gdx
749 $LOAD DIST32
751 $GDXIN

753 Parameter DIST33(I1,J1)
753 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST33 rng=DIST33(I1,J1)!A1:F11
753 output =DIST33.gdx
755 $GDXIN DIST33.gdx

```

```

$LOAD DIST33
757 $GDXIN

759 Parameter DIST34(I0 ,J1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST34 rng=DIST34(I0 ,J1)!A1:F10
output =DIST34.gdx
761 $GDXIN DIST34.gdx
$LOAD DIST34
763 $GDXIN

765 Parameter DIST35(K2,J1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST35 rng=DIST35(K2,J1)!A1:F24
output =DIST35.gdx
767 $GDXIN DIST35.gdx
$LOAD DIST35
769 $GDXIN

771 Parameter DIST36(I1 ,NW)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST36 rng=DIST36(I1 ,NW)!A1:D11
output =DIST36.gdx
773 $GDXIN DIST36.gdx
$LOAD DIST36
775 $GDXIN

777 Parameter DIST37(I0 ,NW)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST37 rng=DIST37(I0 ,NW)!A1:D10
output =DIST37.gdx
779 $GDXIN DIST37.gdx
$LOAD DIST37
781 $GDXIN

783 Parameter DIST38(K2,NW)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST38 rng=DIST38(K2,NW)!A1:D24
output =DIST38.gdx
785 $GDXIN DIST38.gdx
$LOAD DIST38
787 $GDXIN

789 Parameter DIST39(I1 ,MW)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST39 rng=DIST1(K0,I2)!A1:F11
output =DIST39.gdx
791 $GDXIN DIST39.gdx
$LOAD DIST39
793 $GDXIN

795 Parameter DIST40(I0 ,MW)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST40 rng=DIST40(I0 ,MW)!A1:F10
output =DIST40.gdx
797 $GDXIN DIST40.gdx
$LOAD DIST40
799 $GDXIN

801 Parameter DIST41(K2,MW)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST41 rng=DIST41(K2,MW)!A1:F24
output =DIST41.gdx
803 $GDXIN DIST41.gdx

```

```

$LOAD DIST41
805 $GDXIN

807 Parameter DIST42(J1,K0)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST42 rng=DIST42(J1,K0)!A1:J6
output =DIST42.gdx
809 $GDXIN DIST42.gdx
$LOAD DIST42
811 $GDXIN

813 Parameter DIST43(I2,K0)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST43 rng=DIST43(I2,K0)!A1:J5
output =DIST43.gdx
815 $GDXIN DIST43.gdx
$LOAD DIST43
817 $GDXIN

819 Parameter DIST44(NW,K1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST44 rng=DIST44(NW,K1)!A1:U4
output =DIST44.gdx
821 $GDXIN DIST44.gdx
$LOAD DIST44
823 $GDXIN

825 Parameter DIST45(NW,I1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST45 rng=DIST45(NW,I1)!A1:K4
output =DIST45.gdx
827 $GDXIN DIST45.gdx
$LOAD DIST45
829 $GDXIN

831 Parameter DIST46(NW,I2)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST46 rng=DIST46(NW,I2)!A1:E4
output =DIST46.gdx
833 $GDXIN DIST46.gdx
$LOAD DIST46
835 $GDXIN

837 Parameter DIST47(NW,I0)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST47 rng=DIST47(NW,I0)!A1:J4
output =DIST47.gdx
839 $GDXIN DIST47.gdx
$LOAD DIST47
841 $GDXIN

843 Parameter DIST48(MW,K1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST48 rng=DIST48(MW,K1)!A1:U6
output =DIST48.gdx
845 $GDXIN DIST48.gdx
$LOAD DIST48
847 $GDXIN

849 Parameter DIST49(MW,I1)
$call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST49 rng=DIST49(MW,I1)!A1:K6
output =DIST49.gdx
851 $GDXIN DIST49.gdx

```

```

853 $LOAD DIST49
854 $GDXIN
855 Parameter DIST50(MW, I2)
856 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST50 rng=DIST50(MW, I2)!A1:E6
857   output =DIST50.gdx
858 $GDXIN DIST50.gdx
859 $LOAD DIST50
860 $GDXIN
861 Parameter DIST51(MW, I0)
862 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Antof.xlsx par=DIST51 rng=DIST51(MW, I0)!A1:J6
863   output =DIST51.gdx
864 $GDXIN DIST51.gdx
865 $LOAD DIST51
866 $GDXIN
867
868 *Pa[U+FFFD]metros asociados a las precipitaciones
869 *Table F2_1(K5,K0) "flujo de precipitaciones"
870 *
871 *      RV1      RS1      RSP1      RL5      RL4      RL3      RL2
872 *      RL1      SUB
873 *      R 0.000472  0.00732  0.00591  0.00333  0      0      0
874 *      0      0
875
876 *;
877 *****
878 Positive variable
879
880 *Variables para el balance de masa de Fuente natural
881 F0_1(K0,I2) Flujo desde fuente natural hasta consumo ag[U+FFFD]cola
882 F0_2(K0,J01) Flujo desde fuente natural hasta EP1
883 F0_3(K0,ND01) Flujo desde fuente natural hasta ND01
884
885 *Variables para los flujos que salen del mar
886 F1_1(K4,J02) Flujo desde el mar hasta EP2
887 F1_2(K4,ND02) Flujo desde el mar hasta ND02
888
889 *Variables para los flujos provenientes de la lluvia
890 F2_1(K5,K0) Flujo desde lluvia hasta fuente natural
891 F2_2(K5,ND03) Flujo desde lluvia hasta ND03
892
893 *Variables para balance de masa de planta de tratamiento de agua potable
894   existente
895 F3_1(J01,I1) Flujo desde EP1 hasta consumo industrial
896 F3_2(J01,I0) Flujo desde EP1 hasta consumo domiciliario
897 F3_3(J01,I2) Flujo desde EP1 hasta consumo agricola
898 F3_4(J01,K1) Flujo desde EP1 hasta distribucion
899
900 *Variables para balance de masa de planta desalinizadora existente
901 F4_1(J02,I1) Flujo desde EP2 hasta consumo industrial
902 F4_2(J02,I0) Flujo desde EP2 hasta consumo domiciliario

```

903 F4_3(J02,I2) Flujo desde EP2 hasta consumo ~~ag~~[U+FFFD]cola
 F4_4(J02,K1) Flujo desde EP2 hasta distribucion

905 *Variables para **balance** de masa de planta de tratamiento de agua potable de
 fuente natural nueva

907 F5_1(ND01,I1) Flujo desde NP1 hasta consumo industrial
 F5_2(ND01,I0) Flujo desde NP1 hasta consumo domiciliario

909 F5_3(ND01,I2) Flujo desde NP1 hasta consumo agricola
 F5_4(ND01,K1) Flujo desde NP1 hasta distribucion

911 *Variables para **balance** de masa de planta desalinizadora nueva

913 F6_1(ND02,I1) Flujo desde NP2 hasta consumo industrial
 F6_2(ND02,I0) Flujo desde NP2 hasta consumo domiciliario

915 F6_3(ND02,I2) Flujo desde NP2 hasta consumo ~~ag~~[U+FFFD]cola
 F6_4(ND02,K1) Flujo desde NP2 hasta distribucion

917 *Variables para **balance** de masa de planta de tratamiento de agua lluvia nueva

919 F7_1(ND03,I1) Flujo desde NP3 hasta consumo industrial
 F7_2(ND03,I0) Flujo desde NP3 hasta consumo domiciliario

921 F7_3(ND03,I2) Flujo desde NP3 hasta consumo ~~ag~~[U+FFFD]cola
 F7_4(ND03,K1) Flujo desde NP3 hasta distribucion

923 *Variables para **balance** de masa de distribucion

925 F8_1(K1,I1) Flujo desde distribucion hasta consumo industrial
 F8_2(K1,I0) Flujo desde distribucion hasta consumo domiciliario

927 F8_3(K1,I2) Flujo desde distribucion hasta consumo agricola

929 *Variables para **balance** de masa de recoleccion

F9_1(I1,K2) Flujo desde consumo industrial hasta recoleccion

931 F9_2(I0,K2) Flujo desde consumo domiciliario hasta recoleccion

933 *Variables para **balance** de masa de plantas de tratamiento de agua servida
 existentes

F10_1(I1,J1) Flujo desde consumo industrial hasta EW

935 F10_2(I0,J1) Flujo desde consumo domiciliario hasta EW
 F10_3(K2,J1) Flujo desde recoleccion hasta EW

937 *Variables para **balance** de masa de plantas de tratamiento de agua servida
 nuevas

939 F11_1(I1,NW) Flujo desde consumo industrial hasta NW
 F11_2(I0,NW) Flujo desde consumo domiciliario hasta NW

941 F11_3(K2,NW) Flujo desde recoleccion hasta NW

943 *Variables para **balance** de masa de plantas de tratamiento de agua servida
 modificadas

F12_1(I1,MW) Flujo desde consumo industrial hasta MW

945 F12_2(I0,MW) Flujo desde consumo domiciliario hasta MW
 F12_3(K2,MW) Flujo desde recoleccion hasta MW

947 *Variables que van a descarga

949 F13_1(J1,K0) Flujo desde EW hasta fuente natural
 F13_2(I2,K0) Flujo desde consumo agricola hasta fuente natural

951 F13_3(BSE,K0) Flujo ficticio en fuentes subter[U+FFFD]neas que no se carga por
 lluvias

953 *Variables para **balance** de masa de plantas de tratamiento de agua servidas


```

nuevas
F14_1(NW,K1) Flujo desde NW hasta distribucion
955 F14_2(NW, I1) Flujo desde NW hasta consumo industrial
F14_3(NW, I2) Flujo desde NW hasta consumo agrícola
957 F14_4(NW, I0) Flujo desde NW hasta consumo domiciliario

959 *Variables para balance de masa de plantas de tratamiento de agua servidas
      modificadas
F15_1(MW,K1) Flujo desde MW hasta distribucion
961 F15_2(MW, I1) Flujo desde MW hasta consumo industrial
F15_3(MW, I2) Flujo desde MW hasta consumo agrícola
963 F15_4(MW, I0) Flujo desde MW hasta consumo domiciliario

965 *Variables que van a sumidero
F16_1(K0,K3)
967 F16_2(J01,K3)
F16_3(J02,K3)
969 F16_4(ND01,K3)
F16_5(ND02,K3)
971 F16_6(ND03,K3)
F16_7(K1,K3)
973 F16_8(I1,K3)
F16_9(I0,K3)
975 F16_10(I2,K3)
F16_11(K2,K3)
977 F16_12(J1,K3)
F16_13(NW,K3)
979 F16_14(MW,K3)

981 *Otras variables
HuRV, HuRS1, HuRSP1, HuRL5, HuRL4, HuRL3, HuRL2, HuRL1, lm
983 WC1, WC2

985 *Variables de costo
PlantOpCJ01(J01), PlantOpCND01(ND01), PlantOpCND03(ND03), PlantOpCJ02(J02),
      PlantOpCND02(ND02), PlantOpCEW(J1), PlantOpCNW(NW), PlantOpCMW(MW)
987 RedOpC1, RedOpC2, RedOpC3, RedOpC4, RedOpC5, RedOpC6, RedOpC7, RedOpC8,
      RedOpC9, RedOpC10
      RedOpC10, RedOpC11, RedOpC12, RedOpC13, RedOpC14, RedOpC15, RedOpC16, RedOpC17
      , RedOpC18, RedOpC19
989 RedOpC20, RedOpC21, RedOpC22, RedOpC23, RedOpC24, RedOpC25, RedOpC26, RedOpC27
      , RedOpC28, RedOpC29
      RedOpC30, RedOpC31, RedOpC32, RedOpC33, RedOpC34, RedOpC35, RedOpC36, RedOpC37
      , RedOpC38, RedOpC39
991 RedOpC40, RedOpC41, RedOpC42, RedOpC43, RedOpC44, RedOpC45, RedOpC46, RedOpC47
      , RedOpC48, RedOpC49, RedOpC50, RedOpC51
PC1, PC2, PC3
993
PlantCapCND01(ND01), PlantCapCND02(ND02), PlantCapCND03(ND03), PlantCapCNW(NW)
      , PlantCapCMW(MW)
995 RedCapC3, RedCapC5, RedCapC7, RedCapCMW_TC, RedCapCMW_AASG, RedCapCMW_AAB,
      RedCapCMW_AALA, RedCapCMW_ESPC, RedCapCNW_TC1, RedCapCNW_EL1, RedCapCNW_AF1
      , RedCapCNW_TC2, RedCapCNW_EL2, RedCapCNW_AF2
      RedCapCNP1_EL, RedCapCNP1_TC, RedCapCNP2_TC, RedCapCNP2_EL, RedCapCNP2_AF,
      RedCapCNP3_TC, RedCapCNP3_EL, RedCapCNP3_AF
997

```

```

RedOpC, PlantOpC, PlantCapC, RedCapCt
999
;
1001
*****
1003 Binary variable E_EP1(J01), E_EP2(J02), E_EW(J1), E_NP1(ND01), E_NP2(ND02),
E_NP3(ND03), E_NW(NW), E_MW(MW) ;
1005 *****
Free variable AMB, TC, gamma, FO1, FO2
1007
;
1009
*****
1011 Equations BMRV, BMRS1, BMRSP1, BMRL5, BMRL4, BMRL3, BMRL2, BMRL1, BMSUB, BMEP1
(J01), BMEP2(J02), BMNP1(ND01), BMNP2(ND02), BMNP3(ND03), BMDIST(K1), BMCA(
I2), BMCD(I0), BMCI(I1), BMREC(K2), BMEW(J1), BMNW(NW), BMMW(MW)
WLFN(K0), WLEP1(J01), WLEP2(J02), WLNP1(ND01), WLNP2(ND02), WLNP3(
ND03), WLDIS(K1), WLCI(I1), WLCD(I0), WLCA(I2), WLRECC(K2), WLEW(J1), WLNW1
(NW), WLMW1(MW), eqDDAI2(I2), eqDDAI0(I0), eqDDAI1(I1), eq2DDAI2(I2),
eq2DDAI0(I0), eq2DDAI1(I1)
1013 DIM1J01(J01), DIM2J01(J01), DIM1J02(J02), DIM2J02(J02), DIM1EW(J1),
DIM2EW(J1), DIM1MW(MW), DIM2MW(MW), EN1NP1(ND01), EN2NP1(ND01), EN1NP2(ND02)
), EN2NP2(ND02), EN1NP3(ND03), EN2NP3(ND03), EN1NW(NW), EN2NW(NW)
UBI(MW,J1), EQWC1, EQWC2, EQAMB1, EQAMB2
1015 * MAXR_RV1, MAXR_RS1, MAXR_RSP1, MAXR_RL5
MAXR_RL4, MAXR_RL3, MAXR_RL2, MAXR_RL1, MAXR_SUB
1017 CONRV1_1, CONRV1_2, CONRV1_3, CONRV1_4, CONRV1_5, CONRV1_6, CONRV1_7
, CONRV1_8, CONRV1_9, CONRS1_1, CONRS1_2, CONRS1_3, CONRS1_4, CONRS1_5,
CONRS1_6, CONRS1_7, CONRS1_8, CONRS1_9
CONRSP1_1, CONRSP1_2, CONRSP1_3, CONRSP1_4, CONRSP1_5, CONRSP1_6,
CONRSP1_7, CONRSP1_8, CONRSP1_9, CONRL5_1, CONRL5_2, CONRL5_3, CONRL5_4,
CONRL5_5, CONRL5_6, CONRL5_7, CONRL5_8, CONRL5_9
1019 MAXLL_LLL5, MAXLL_LLS1, MAXLL_LLSP1, MAXLL_LL1V1, MAXLL_TCQ4,
MAXLL_TCQ1, MAXLL_CUPO, MAXLL_RGR, MAXLL_ET, MAXBSE
OpC_J01(J01), OpC_ND01(ND01), OpC_ND03(ND03), OpC_J02(J02), OpC_ND02
(ND02), OpC_EW(J1), OpC_NW(NW), OpC_MW(MW)
1021 OpC1, OpC2, OpC3, OpC4, OpC5, OpC6, OpC7, OpC8, OpC9, OpC10, OpC11,
OpC12, OpC13, OpC14, OpC15, OpC16, OpC17, OpC18, OpC19, OpC20, OpC21, OpC22
, OpC23, OpC24, OpC25, OpC26, OpC27, OpC28, OpC29
OpC30, OpC31, OpC32, OpC33, OpC34, OpC35, OpC36, OpC37, OpC38, OpC39
, OpC40, OpC41, OpC42, OpC43, OpC44, OpC45, OpC46, OpC47, OpC48, OpC49,
OpC50, OpC51, PARTIALCOST1, PARTIALCOST2, PARTIALCOST3, TotalCost
1023 CapC_ND01(ND01), CapC_ND02(ND02), CapC_ND03(ND03), CapC_NW(NW),
CapC_MW(MW), RedOpCtotal, PlantOpCtotal, PlantCapCtotal
CapC3, CapC5, CapC7, CapCNP1_1, CapCNP1_2, CapCNP2_1, CapCNP2_2,
CapCNP2_3, CapCNP3_1, CapCNP3_2, CapCNP3_3, CapCNW_11, CapCNW_12, CapCNW_13
, CapCNW_21, CapCNW_22, CapCNW_23, CapCMW_1, CapCMW_2, CapCMW_3, CapCMW_4,
CapCMW_5
1025 RedCapCtotal, Desc, Desc2, BARR1(K1), BARR2(I2), BARR3(I0), BARR4(I1
), FO1, FO2, MO1, MO2, FOAMB, SUB1, RESCON
;
1027 *eq2 .. sum(K0, sum(I4121, F11_121(K0, I4121)))+ sum(I4122, F11_122(K0, I4122))+ sum
(J01, F12_1(K0, J01))+sum(J02, F12_2(K0, J02))+sum(I22, F13(K0, I22))+sum(I3,
F14(K0, I3))+sum(ND01, F15_1(K0, ND01))+sum(ND02, F15_2(K0, ND02))) =E= G0 ;

```

1029 *BMGlob.. $\text{sum}(K0, \text{sum}(I4121, F11_121(K0, I4121)) + \text{sum}(I4122, F11_122(K0, I4122)) + \text{sum}(J01, F12_1(K0, J01)) + \text{sum}(J02, F12_2(K0, J02)) + \text{sum}(I22, F13(K0, I22)) + \text{sum}(I3, F14(K0, I3)) + \text{sum}(ND01, F15_1(K0, ND01)) + \text{sum}(ND02, F15_2(K0, ND02))) =E= \text{sum}(K22, (\text{sum}(I3, F42(I3, K22)) + \text{sum}(I21, F43(I21, K22)) + \text{sum}(I22, F43_2(I22, K22)))) + \text{sum}(K21, (\text{sum}(J2122, F41_122(J2122, K21)) + \text{sum}(J2112, F41_112(J2112, K21)) + \text{sum}(J11, F44_1(J11, K21)) + \text{sum}(J12, F44_2(J12, K21)) + \text{sum}(NW41, FN7_1(NW41, K21)) + \text{sum}(NW42, FN7_2(NW42, K21)))) + \text{sum}(K3, (\text{sum}(J01, F82_1(J01, K3)) + \text{sum}(J02, F82_2(J02, K3)) + \text{sum}(I4121, F81_121(I4121, K3)) + \text{sum}(I4122, F81_122(I4122, K3)) + \text{sum}(I4111, F81_111(I4111, K3)) + \text{sum}(I4112, F81_112(I4112, K3)) + \text{sum}(I42, F81_2(I42, K3)) + \text{sum}(I1, F87(I1, K3)) + \text{sum}(I0, F86(I0, K3)) + \text{sum}(I3, F84(I3, K3)) + \text{sum}(I21, F83_1(I21, K3)) + \text{sum}(I22, F83_2(I22, K3)) + \text{sum}(J2121, F85_121(J2121, K3)) + \text{sum}(J2122, F85_122(J2122, K3)) + \text{sum}(J2111, F85_111(J2111, K3)) + \text{sum}(J2112, F85_112(J2112, K3)) + \text{sum}(J22, F85_2(J22, K3)) + \text{sum}(J11, F88_1(J11, K3)) + \text{sum}(J12, F88_2(J12, K3)) + \text{sum}(K4, F89(K4, K3)) + \text{sum}(K5, F810(K5, K3)) + \text{sum}(ND01, F811_1(ND01, K3)) + \text{sum}(ND02, F811_2(ND02, K3)) + \text{sum}(NW11, F812_1(NW11, K3)) + \text{sum}(NW12, F812_2(NW12, K3)) + \text{sum}(NW21, F813_1(NW21, K3)) + \text{sum}(NW22, F813_2(NW22, K3)) + \text{sum}(NW31, F814_1(NW31, K3)) + \text{sum}(NW32, F814_2(NW32, K3)) + \text{sum}(NW41, F815_1(NW41, K3)) + \text{sum}(NW42, F815_2(NW42, K3)) + \text{sum}(MW11, F816_1(MW11, K3)) + \text{sum}(MW12, F816_2(MW12, K3)) + \text{sum}(MW21, F817_1(MW21, K3)) + \text{sum}(MW22, F817_2(MW22, K3)) + \text{sum}(MW31, F818_1(MW31, K3)) + \text{sum}(MW32, F818_2(MW32, K3)))) ;$

1031 * Las siguientes ecuaciones son para el **balance** de masa en fuentes naturales
 BMRV.. $\text{HuRV} =E= \text{sum}(K5, F2_1(K5, 'RV1')) + \text{sum}(J1, F13_1(J1, 'RV1')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RV1')) - \text{sum}(I2, F0_1('RV1', I2)) - \text{sum}(J01, F0_2('RV1', J01)) - \text{sum}(ND01, F0_3('RV1', ND01)) - \text{sum}(K3, F16_1('RV1', K3)) ;$

1033 BMRs1.. $\text{HuRS1} =E= \text{sum}(K5, F2_1(K5, 'RS1')) + \text{sum}(J1, F13_1(J1, 'RS1')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RS1')) - \text{sum}(I2, F0_1('RS1', I2)) - \text{sum}(J01, F0_2('RS1', J01)) - \text{sum}(ND01, F0_3('RS1', ND01)) - \text{sum}(K3, F16_1('RS1', K3)) ;$

BMRSP1.. $\text{HuRSP1} =E= \text{sum}(K5, F2_1(K5, 'RSP1')) + \text{sum}(J1, F13_1(J1, 'RSP1')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RSP1')) - \text{sum}(I2, F0_1('RSP1', I2)) - \text{sum}(J01, F0_2('RSP1', J01)) - \text{sum}(ND01, F0_3('RSP1', ND01)) - \text{sum}(K3, F16_1('RSP1', K3)) ;$

1035 BMRl5.. $\text{HuRL5} =E= \text{sum}(K5, F2_1(K5, 'RL5')) + \text{sum}(J1, F13_1(J1, 'RL5')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL5')) + \text{HuRSP1} + \text{HuRS1} - \text{sum}(I2, F0_1('RL5', I2)) - \text{sum}(J01, F0_2('RL5', J01)) - \text{sum}(ND01, F0_3('RL5', ND01)) - \text{sum}(K3, F16_1('RL5', K3)) ;$

BMRl4.. $\text{HuRL4} =E= \text{sum}(K5, F2_1(K5, 'RL4')) + \text{sum}(J1, F13_1(J1, 'RL4')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL4')) + \text{HuRL5} - \text{sum}(I2, F0_1('RL4', I2)) - \text{sum}(J01, F0_2('RL4', J01)) - \text{sum}(ND01, F0_3('RL4', ND01)) - \text{sum}(K3, F16_1('RL4', K3)) ;$

1037 BMRl3.. $\text{HuRL3} =E= \text{sum}(K5, F2_1(K5, 'RL3')) + \text{sum}(J1, F13_1(J1, 'RL3')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL3')) + \text{HuRL4} - \text{sum}(I2, F0_1('RL3', I2)) - \text{sum}(J01, F0_2('RL3', J01)) - \text{sum}(ND01, F0_3('RL3', ND01)) - \text{sum}(K3, F16_1('RL3', K3)) ;$

BMRl2.. $\text{HuRL2} =E= \text{sum}(K5, F2_1(K5, 'RL2')) + \text{sum}(J1, F13_1(J1, 'RL2')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL2')) + \text{HuRL3} - \text{sum}(I2, F0_1('RL2', I2)) - \text{sum}(J01, F0_2('RL2', J01)) - \text{sum}(ND01, F0_3('RL2', ND01)) - \text{sum}(K3, F16_1('RL2', K3)) ;$

1039 BMRl1.. $\text{HuRL1} =E= \text{sum}(K5, F2_1(K5, 'RL1')) + \text{sum}(J1, F13_1(J1, 'RL1')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL1')) + \text{HuRL2} - \text{sum}(I2, F0_1('RL1', I2)) - \text{sum}(J01, F0_2('RL1', J01)) - \text{sum}(ND01, F0_3('RL1', ND01)) - \text{sum}(K3, F16_1('RL1', K3)) ;$

BMSUB.. $\text{sum}(I2, F13_2(I2, 'SUB')) + \text{sum}(BSE, F13_3(BSE, 'SUB')) =E= \text{sum}(I2, F0_1('SUB', I2)) + \text{sum}(J01, F0_2('SUB', J01)) + \text{sum}(ND01, F0_3('SUB', ND01)) + \text{sum}(K3, F16_1('SUB', K3)) ;$

1041 *Rest sub

1043 SUB1.. $\text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RV1')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RS1')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RSP1')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL5')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL4')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL3')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL2')) + \text{sum}(I2, F13_2(I2, 'RL1')) =E=0 ;$

1045 *Las siguientes ecuaciones corresponden al flujo de agua que cae en cada

elemento de fuente natural

1047 *Las siguientes ecuaciones son para el **balance** de masa en plantas de
potabilizaci[U+FFFD]n existentes

1049 $BMEP1(J01) \dots \text{sum}(K0, F0_2(K0, J01)) =E= \text{sum}(I1, F3_1(J01, I1)) + \text{sum}(I0, F3_2(J01, I0)) + \text{sum}(I2, F3_3(J01, I2)) + \text{sum}(K1, F3_4(J01, K1)) + \text{sum}(K3, F16_2(J01, K3));$
 $BMEP2(J02) \dots \text{sum}(K4, F1_1(K4, J02)) =E= \text{sum}(I1, F4_1(J02, I1)) + \text{sum}(I0, F4_2(J02, I0)) + \text{sum}(I2, F4_3(J02, I2)) + \text{sum}(K1, F4_4(J02, K1)) + \text{sum}(K3, F16_3(J02, K3));$

1051 *Las siguientes ecuaciones son para el **balance** de masa en plantas de
potabilizaci[U+FFFD]n nuevas

1053 $BMNP1(ND01) \dots \text{sum}(K0, F0_3(K0, ND01)) =E= \text{sum}(I1, F5_1(ND01, I1)) + \text{sum}(I0, F5_2(ND01, I0)) + \text{sum}(I2, F5_3(ND01, I2)) + \text{sum}(K1, F5_4(ND01, K1)) + \text{sum}(K3, F16_4(ND01, K3));$
 $BMNP2(ND02) \dots \text{sum}(K4, F1_2(K4, ND02)) =E= \text{sum}(I1, F6_1(ND02, I1)) + \text{sum}(I0, F6_2(ND02, I0)) + \text{sum}(I2, F6_3(ND02, I2)) + \text{sum}(K1, F6_4(ND02, K1)) + \text{sum}(K3, F16_5(ND02, K3));$
1055 $BMNP3(ND03) \dots \text{sum}(K5, F2_2(K5, ND03)) =E= \text{sum}(I1, F7_1(ND03, I1)) + \text{sum}(I0, F7_2(ND03, I0)) + \text{sum}(I2, F7_3(ND03, I2)) + \text{sum}(K1, F7_4(ND03, K1)) + \text{sum}(K3, F16_6(ND03, K3));$

1057 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa en distribucion

$BMDIST(K1) \dots \text{sum}(J01, F3_4(J01, K1)) + \text{sum}(J02, F4_4(J02, K1)) + \text{sum}(ND01, F5_4(ND01, K1)) + \text{sum}(ND02, F6_4(ND02, K1)) + \text{sum}(ND03, F7_4(ND03, K1)) + \text{sum}(NW, F14_1(NW, K1)) + \text{sum}(MW, F15_1(MW, K1)) =E= \text{sum}(I1, F8_1(K1, I1)) + \text{sum}(I0, F8_2(K1, I0)) + \text{sum}(I2, F8_3(K1, I2)) + \text{sum}(K3, F16_7(K1, K3));$

1059 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa del consumo agricola

1061 $BMCA(I2) \dots \text{sum}(J01, F3_3(J01, I2)) + \text{sum}(J02, F4_3(J02, I2)) + \text{sum}(ND01, F5_3(ND01, I2)) + \text{sum}(ND02, F6_3(ND02, I2)) + \text{sum}(ND03, F7_3(ND03, I2)) + \text{sum}(K1, F8_3(K1, I2)) + \text{sum}(K0, F0_1(K0, I2)) + \text{sum}(NW, F14_3(NW, I2)) + \text{sum}(MW, F15_3(MW, I2)) =E= \text{sum}(K0, F13_2(I2, K0)) + \text{sum}(K3, F16_10(I2, K3));$

1063 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa del consumo domiciliario

$BMCD(I0) \dots \text{sum}(J01, F3_2(J01, I0)) + \text{sum}(J02, F4_2(J02, I0)) + \text{sum}(ND01, F5_2(ND01, I0)) + \text{sum}(ND02, F6_2(ND02, I0)) + \text{sum}(ND03, F7_2(ND03, I0)) + \text{sum}(K1, F8_2(K1, I0)) + \text{sum}(NW, F14_4(NW, I0)) + \text{sum}(MW, F15_4(MW, I0)) =E= \text{sum}(K2, F9_2(I0, K2)) + \text{sum}(J1, F10_2(I0, J1)) + \text{sum}(NW, F11_2(I0, NW)) + \text{sum}(MW, F12_2(I0, MW)) + \text{sum}(K3, F16_9(I0, K3));$

1065 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa del consumo industrial

1067 $BMCI(I1) \dots \text{sum}(J01, F3_1(J01, I1)) + \text{sum}(J02, F4_1(J02, I1)) + \text{sum}(ND01, F5_1(ND01, I1)) + \text{sum}(ND02, F6_1(ND02, I1)) + \text{sum}(ND03, F7_1(ND03, I1)) + \text{sum}(K1, F8_1(K1, I1)) + \text{sum}(NW, F14_2(NW, I1)) + \text{sum}(MW, F15_2(MW, I1)) =E= \text{sum}(K2, F9_1(I1, K2)) + \text{sum}(J1, F10_1(I1, J1)) + \text{sum}(NW, F11_1(I1, NW)) + \text{sum}(MW, F12_1(I1, MW)) + \text{sum}(K3, F16_8(I1, K3));$

1069 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa de recoleccion

$BMREC(K2) \dots \text{sum}(I1, F9_1(I1, K2)) + \text{sum}(I0, F9_2(I0, K2)) =E= \text{sum}(J1, F10_3(K2, J1)) + \text{sum}(NW, F11_3(K2, NW)) + \text{sum}(MW, F12_3(K2, MW)) + \text{sum}(K3, F16_11(K2, K3));$

1071 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa de plantas de tratamiento de
agua servida existentes

1073 $BMEW(J1) \dots \text{sum}(K2, F10_3(K2, J1)) + \text{sum}(I1, F10_1(I1, J1)) + \text{sum}(I0, F10_2(I0, J1)) =E= \text{sum}(K0, F13_1(J1, K0)) + \text{sum}(K3, F16_12(J1, K3));$

1075 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa de plantas de tratamiento de

```

    agua servida nuevas con calidad de salida potable
1077 BMW(NW) .. sum(K2,F11_3(K2,NW))+sum(I1,F11_1(I1,NW))+sum(I0,F11_2(I0,NW)) =E=
    sum(K1,F14_1(NW,K1))+sum(I1,F14_2(NW,I1))+sum(I2,F14_3(NW,I2))+sum(I0,F14_4
    (NW,I0))+sum(K3,F16_13(NW,K3));

*La siguiente ecuacion es para el balance de masa en plantas de tratamiento de
    agua servida modificadas con calidad de salida potable
1079 BMW(MW) .. sum(K2,F12_3(K2,MW))+sum(I1,F12_1(I1,MW))+sum(I0,F12_2(I0,MW)) =E=
    sum(K1,F15_1(MW,K1))+sum(I1,F15_2(MW,I1))+sum(I2,F15_3(MW,I2))+sum(I0,F15_4
    (MW,I0))+sum(K3,F16_14(MW,K3));

1081 *Cumplimiento de demanda
1083 eqDDAI2(I2) .. sum(J01,F3_3(J01,I2))+sum(J02,F4_3(J02,I2))+sum(ND01,F5_3(ND01,
    I2))+sum(ND02,F6_3(ND02,I2))+sum(ND03,F7_3(ND03,I2))+sum(K1,F8_3(K1,I2))+
    sum(K0,F0_1(K0,I2))+sum(NW,F14_3(NW,I2))+sum(MW,F15_3(MW,I2)) =G= DDA2(I2);
    eqDDAI0(I0) .. sum(J01,F3_2(J01,I0))+sum(J02,F4_2(J02,I0))+sum(ND01,F5_2(ND01,
    I0))+sum(ND02,F6_2(ND02,I0))+sum(ND03,F7_2(ND03,I0))+sum(K1,F8_2(K1,I0))+
    sum(NW,F14_4(NW,I0))+sum(MW,F15_4(MW,I0)) =G= DDA0(I0);
1085 eqDDAI1(I1) .. sum(J01,F3_1(J01,I1))+sum(J02,F4_1(J02,I1))+sum(ND01,F5_1(ND01,
    I1))+sum(ND02,F6_1(ND02,I1))+sum(ND03,F7_1(ND03,I1))+sum(K1,F8_1(K1,I1))+
    sum(NW,F14_2(NW,I1))+sum(MW,F15_2(MW,I1)) =G= DDA1(I1);

1087 *Limite para sobre demanda
    eq2DDAI2(I2) .. sum(J01,F3_3(J01,I2))+sum(J02,F4_3(J02,I2))+sum(ND01,F5_3(ND01,
    I2))+sum(ND02,F6_3(ND02,I2))+sum(ND03,F7_3(ND03,I2))+sum(K1,F8_3(K1,I2))+
    sum(K0,F0_1(K0,I2))+sum(NW,F14_3(NW,I2))+sum(MW,F15_3(MW,I2)) =L= DDA2(I2)
    +0.5;
1089 eq2DDAI0(I0) .. sum(J01,F3_2(J01,I0))+sum(J02,F4_2(J02,I0))+sum(ND01,F5_2(ND01,
    I0))+sum(ND02,F6_2(ND02,I0))+sum(ND03,F7_2(ND03,I0))+sum(K1,F8_2(K1,I0))+
    sum(NW,F14_4(NW,I0))+sum(MW,F15_4(MW,I0)) =L= DDA0(I0)+0.5;
    eq2DDAI1(I1) .. sum(J01,F3_1(J01,I1))+sum(J02,F4_1(J02,I1))+sum(ND01,F5_1(ND01,
    I1))+sum(ND02,F6_1(ND02,I1))+sum(ND03,F7_1(ND03,I1))+sum(K1,F8_1(K1,I1))+
    sum(NW,F14_2(NW,I1))+sum(MW,F15_2(MW,I1)) =L= DDA1(I1)+0.5;

1091

1093 *Flujos al sumidero
    WLFN(K0) .. sum(K3,F16_1(K0,K3)) =E= (sum(K5,F2_1(K5,K0))+sum(J1,F13_1(J1,K0))
    +sum(I2,F13_2(I2,K0)))*WLK0(K0);
1095 WLEP1(J01) .. sum(K3,F16_2(J01,K3)) =E= sum(K0,F0_2(K0,J01))*WLJ01(J01);
    WLEP2(J02) .. sum(K3,F16_3(J02,K3)) =E= sum(K4,F1_1(K4,J02))*WLJ02(J02);
1097 WLN1(ND01) .. sum(K3,F16_4(ND01,K3)) =E= sum(K0,F0_3(K0,ND01))*WLND01(ND01);
    WLN2(ND02) .. sum(K3,F16_5(ND02,K3)) =E= sum(K4,F1_2(K4,ND02))*WLND02(ND02);
1099 WLN3(ND03) .. sum(K3,F16_6(ND03,K3)) =E= sum(K5,F2_2(K5,ND03))*WLND03(ND03);
    WLDIS(K1) .. sum(K3,F16_7(K1,K3)) =E= (sum(J01,F3_4(J01,K1))+sum(J02,F4_4(J02,
    K1))+sum(ND01,F5_4(ND01,K1))+sum(ND02,F6_4(ND02,K1))+sum(ND03,F7_4(ND03,K1))
    +sum(NW,F14_1(NW,K1))+sum(MW,F15_1(MW,K1)))*WLK1(K1);
1101 WLCI(I1) .. sum(K3,F16_8(I1,K3)) =E= (sum(J01,F3_1(J01,I1))+sum(J02,F4_1(J02,I1)
    +sum(ND01,F5_1(ND01,I1))+sum(ND02,F6_1(ND02,I1))+sum(ND03,F7_1(ND03,I1))+
    sum(K1,F8_1(K1,I1))+sum(NW,F14_2(NW,I1))+sum(MW,F15_2(MW,I1)))*WLI1(I1);
    WLCD(I0) .. sum(K3,F16_9(I0,K3)) =E= (sum(J01,F3_2(J01,I0))+sum(J02,F4_2(J02,I0)
    +sum(ND01,F5_2(ND01,I0))+sum(ND02,F6_2(ND02,I0))+sum(ND03,F7_2(ND03,I0))+
    sum(K1,F8_2(K1,I0))+sum(NW,F14_4(NW,I0))+sum(MW,F15_4(MW,I0)))*WLI0(I0);
1103 WLCA(I2) .. sum(K3,F16_10(I2,K3)) =E= (sum(J01,F3_3(J01,I2))+sum(J02,F4_3(J02,
    I2))+sum(ND01,F5_3(ND01,I2))+sum(ND02,F6_3(ND02,I2))+sum(ND03,F7_3(ND03,I2))
    +sum(K1,F8_3(K1,I2))+sum(K0,F0_1(K0,I2))+sum(NW,F14_3(NW,I2))+sum(MW,F15_3

```

```

(MW, I2)) *WLI2(I2);
WIRECC(K2) .. sum(K3, F16_11(K2, K3)) =E= (sum(I1, F9_1(I1, K2)) + sum(I0, F9_2(I0,
K2))) *WLK2(K2);
1105 WLEW(J1) .. sum(K3, F16_12(J1, K3)) =E= (sum(K2, F10_3(K2, J1)) + sum(I1, F10_1(I1, J1)
) + sum(I0, F10_2(I0, J1))) *WLJ1(J1);
WLNW1(NW) .. sum(K3, F16_13(NW, K3)) =E= (sum(K2, F11_3(K2, NW)) + sum(I1, F11_1(I1, NW
)) + sum(I0, F11_2(I0, NW))) *WLNW(NW);
1107 WLMW1(MW) .. sum(K3, F16_14(MW, K3)) =E= (sum(K2, F12_3(K2, MW)) + sum(I1, F12_1(I1, MW
)) + sum(I0, F12_2(I0, MW))) *WLMW(MW);

1109 *Capacidad maxima de plantas de tratamiento
DIM1J01(J01) .. sum(K0, F0_2(K0, J01)) =L= AFJ01(J01) *1.23 *E_EP1(J01);
1111 DIM2J01(J01) .. sum(K0, F0_2(K0, J01)) =G= AFJ01(J01) *0.75 *0.85 *E_EP1(J01);
DIM1J02(J02) .. sum(K4, F1_1(K4, J02)) =L= AFJ02(J02) *1.32 *E_EP2(J02);
1113 DIM2J02(J02) .. sum(K4, F1_1(K4, J02)) =G= AFJ02(J02) *0.75 *0.85 *E_EP2(J02);
DIM1EW(J1) .. (sum(K2, F10_3(K2, J1)) + sum(I1, F10_1(I1, J1)) + sum(I0, F10_2(I0, J1)))
=L= AFJ1(J1) *1.23 *E_EW(J1);
1115 DIM2EW(J1) .. (sum(K2, F10_3(K2, J1)) + sum(I1, F10_1(I1, J1)) + sum(I0, F10_2(I0, J1)))
=G= AFJ1(J1) *0.75 *0.85 *E_EW(J1);
DIM1MW(MW) .. (sum(K2, F12_3(K2, MW)) + sum(I1, F12_1(I1, MW)) + sum(I0, F12_2(I0, MW)))
=L= AFMW(MW) *1.23 *E_MW(MW);
1117 DIM2MW(MW) .. (sum(K2, F12_3(K2, MW)) + sum(I1, F12_1(I1, MW)) + sum(I0, F12_2(I0, MW)))
=G= AFMW(MW) *0.75 *0.85 *E_MW(MW);

1119 *Restricciones logicas de existencia
EN1NP1(ND01) .. sum(K0, F0_3(K0, ND01)) =L= M *E_NP1(ND01);
1121 EN2NP1(ND01) .. sum(K0, F0_3(K0, ND01)) *M =G= E_NP1(ND01);
EN1NP2(ND02) .. sum(K4, F1_2(K4, ND02)) =L= M *E_NP2(ND02);
1123 EN2NP2(ND02) .. sum(K4, F1_2(K4, ND02)) *M =G= E_NP2(ND02);
EN1NP3(ND03) .. sum(K5, F2_2(K5, ND03)) =L= M *E_NP3(ND03);
1125 EN2NP3(ND03) .. sum(K5, F2_2(K5, ND03)) *M =G= E_NP3(ND03);
EN1NW(NW) .. sum(K2, F11_3(K2, NW)) + sum(I1, F11_1(I1, NW)) + sum(I0, F11_2(I0, NW)) =L
= M *E_NW(NW);
1127 EN2NW(NW) .. (sum(K2, F11_3(K2, NW)) + sum(I1, F11_1(I1, NW)) + sum(I0, F11_2(I0, NW))) *
M =G= E_NW(NW);
UBI(MW, J1) .. E_EW(J1) + E_MW(MW) =L= 1;
1129

1131 [U+FFFD]ximode precipitaciones
*MAXR_RV1.. sum(K5, F2_1(K5, 'RV1')) =L= 0.000472;
1133 *MAXR_RS1.. sum(K5, F2_1(K5, 'RS1')) =L= 0.007319931022;
*MAXR_RSP1.. sum(K5, F2_1(K5, 'RSP1')) =L= 0.009262552328;
1135 *MAXR_RL5.. sum(K5, F2_1(K5, 'RL5')) =L= 0.005233545604;
MAXR_RL4.. sum(K5, F2_1(K5, 'RL4')) =E= 0;
1137 MAXR_RL3.. sum(K5, F2_1(K5, 'RL3')) =E= 0;
MAXR_RL2.. sum(K5, F2_1(K5, 'RL2')) =E= 0;
1139 MAXR_RL1.. sum(K5, F2_1(K5, 'RL1')) =E= 0;
MAXR_SUB.. sum(K5, F2_1(K5, 'SUB')) =E= 0;
1141

1143 *Conexiones entre [U+FFFD]osy fuentes ficticias de lluvia, por [U+FFFD]a
1145 CONRV1_1.. F2_1('LLL5', 'RV1') =E= 0;
CONRV1_2.. F2_1('LLS1', 'RV1') =E= 0;
CONRV1_3.. F2_1('LLSP1', 'RV1') =E= 0;
1147 CONRV1_4.. F2_1('LLV1', 'RV1') =E= 0.00472 -lm;
CONRV1_5.. F2_1('TCQ4', 'RV1') =E= 0;

```

```

1149 CONRV1_6.. F2_1( 'CUPO' , 'RV1' ) =E= 0;
CONRV1_7.. F2_1( 'TCQ1' , 'RV1' ) =E= 0;
1151 CONRV1_8.. F2_1( 'RGR' , 'RV1' ) =E= 0;
CONRV1_9.. F2_1( 'ET' , 'RV1' ) =E= 0;
1153
1155 CONRS1_1.. F2_1( 'LLL5' , 'RS1' ) =E= 0;
CONRS1_2.. F2_1( 'LLS1' , 'RS1' ) =E= 0.007319931022 -lm;
1157 CONRS1_3.. F2_1( 'LLSP1' , 'RS1' ) =E= 0;
CONRS1_4.. F2_1( 'LLV1' , 'RS1' ) =E= 0;
1159 CONRS1_5.. F2_1( 'TCQ4' , 'RS1' ) =E= 0;
CONRS1_6.. F2_1( 'CUPO' , 'RS1' ) =E= 0;
1161 CONRS1_7.. F2_1( 'TCQ1' , 'RS1' ) =E= 0;
CONRS1_8.. F2_1( 'RGR' , 'RS1' ) =E= 0;
1163 CONRS1_9.. F2_1( 'ET' , 'RS1' ) =E= 0;
1165
CONRSP1_1.. F2_1( 'LLL5' , 'RSP1' ) =E= 0;
1167 CONRSP1_2.. F2_1( 'LLS1' , 'RSP1' ) =E= 0;
CONRSP1_3.. F2_1( 'LLSP1' , 'RSP1' ) =E= 0.009262552328 -lm;
1169 CONRSP1_4.. F2_1( 'LLV1' , 'RSP1' ) =E= 0;
CONRSP1_5.. F2_1( 'TCQ4' , 'RSP1' ) =E= 0;
1171 CONRSP1_6.. F2_1( 'CUPO' , 'RSP1' ) =E= 0;
CONRSP1_7.. F2_1( 'TCQ1' , 'RSP1' ) =E= 0;
1173 CONRSP1_8.. F2_1( 'RGR' , 'RSP1' ) =E= 0;
CONRSP1_9.. F2_1( 'ET' , 'RSP1' ) =E= 0;
1175
1177 CONRL5_1.. F2_1( 'LLL5' , 'RL5' ) =E= 0.005233545604 -lm;
CONRL5_2.. F2_1( 'LLS1' , 'RL5' ) =E= 0;
1179 CONRL5_3.. F2_1( 'LLSP1' , 'RL5' ) =E= 0;
CONRL5_4.. F2_1( 'LLV1' , 'RL5' ) =E= 0;
1181 CONRL5_5.. F2_1( 'TCQ4' , 'RL5' ) =E= 0;
CONRL5_6.. F2_1( 'CUPO' , 'RL5' ) =E= 0;
1183 CONRL5_7.. F2_1( 'TCQ1' , 'RL5' ) =E= 0;
CONRL5_8.. F2_1( 'RGR' , 'RL5' ) =E= 0;
1185 CONRL5_9.. F2_1( 'ET' , 'RL5' ) =E= 0;
1187 RESCON.. lm =L= 0.001;
1189 *Flujos[U+FFFD]ximosasociados a fuente ficticias de lluvia
1191 MAXLL_LLL5.. sum(K0,F2_1( 'LLL5' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'LLL5' ,ND03)) =E=
0.005233545604;
MAXLL_LLS1.. sum(K0,F2_1( 'LLS1' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'LLS1' ,ND03)) =E=
0.007319931022;
1193 MAXLL_LLSP1.. sum(K0,F2_1( 'LLSP1' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'LLSP1' ,ND03)) =E=
0.009262552328;
MAXLL_LL1V1.. sum(K0,F2_1( 'LLV1' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'LLV1' ,ND03)) =E= 0.00472;
1195 MAXLL_TCQ4.. sum(K0,F2_1( 'TCQ4' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'TCQ4' ,ND03)) =E=
0.001896486109;
MAXLL_CUPO.. sum(K0,F2_1( 'CUPO' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'CUPO' ,ND03)) =E=
0.002750983128;
1197 MAXLL_TCQ1.. sum(K0,F2_1( 'TCQ1' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'TCQ1' ,ND03)) =E=
0.00329506533;
MAXLL_RGR.. sum(K0,F2_1( 'RGR' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'RGR' ,ND03)) =E=

```

```

0.002864391729;
1199 MAXLL_ET.. sum(K0,F2_1('ET',K0))+sum(ND03,F2_2('ET',ND03)) =E= 0.00346790562;
MAXBSE.. sum(BSE,F13_3(BSE,'SUB')) =E= 0.0000005;
1201
* Escenarios
1203 BARR1(K1) .. sum(NW,F14_1(NW,K1))+sum(MW,F15_1(MW,K1)) =L= BHum*(sum(J01,F3_4(
J01,K1))+sum(J02,F4_4(J02,K1))+sum(ND01,F5_4(ND01,K1))+sum(ND02,F6_4(ND02,
K1))+sum(ND03,F7_4(ND03,K1))+sum(NW,F14_1(NW,K1))+sum(MW,F15_1(MW,K1)));
BARR2(I2) .. sum(NW,F14_3(NW,I2))+sum(MW,F15_3(MW,I2)) =L= BHum*(sum(J01,F3_3(
J01,I2))+sum(J02,F4_3(J02,I2))+sum(ND01,F5_3(ND01,I2))+sum(ND02,F6_3(ND02,
I2))+sum(ND03,F7_3(ND03,I2))+sum(K1,F8_3(K1,I2))+sum(K0,F0_1(K0,I2))+sum(NW
,F14_3(NW,I2))+sum(MW,F15_3(MW,I2)));
1205 BARR3(I0) .. sum(NW,F14_4(NW,I0))+sum(MW,F15_4(MW,I0)) =L= BHum*(sum(J01,F3_2(
J01,I0))+sum(J02,F4_2(J02,I0))+sum(ND01,F5_2(ND01,I0))+sum(ND02,F6_2(ND02,
I0))+sum(ND03,F7_2(ND03,I0))+sum(K1,F8_2(K1,I0))+sum(NW,F14_4(NW,I0))+sum(
MW,F15_4(MW,I0)));
BARR4(I1) .. sum(NW,F14_2(NW,I1))+sum(MW,F15_2(MW,I1)) =L= BHum*(sum(J01,F3_1(
J01,I1))+sum(J02,F4_1(J02,I1))+sum(ND01,F5_1(ND01,I1))+sum(ND02,F6_1(ND02,
I1))+sum(ND03,F7_1(ND03,I1))+sum(K1,F8_1(K1,I1))+sum(NW,F14_2(NW,I1))+sum(
MW,F15_2(MW,I1)));
1207
*Otras restricciones
1209 Desc.. sum(J1,F13_1(J1,'SUB')) =E= 0;
1211 Desc2.. sum(K5,F2_1(K5,'SUB')) =E=0;
1213
* Restricciones [U+FFFD]micas
1215
*OPERACIONALES
1217
* Plantas de tratamiento
1219 OpC_J01(J01) .. PlantOpCJ01(J01) =E= ((39804*sum(K0,F0_2(K0,J01)))+E_EP1(J01)
*701611);
OpC_ND01(ND01) .. PlantOpCND01(ND01) =E= ((39804*sum(K0,F0_3(K0,ND01)))+E_NP1(
ND01)*701611);
1221 OpC_ND03(ND03) .. PlantOpCND03(ND03) =E= ((39804*sum(K5,F2_2(K5,ND03)))+E_NP3(
ND03)*701611);
1223 OpC_J02(J02) .. PlantOpCJ02(J02) =E= ((4646261*sum(K4,F1_1(K4,J02)))+E_EP2(J02)
*700594);
OpC_ND02(ND02) .. PlantOpCND02(ND02) =E= ((4646261*sum(K4,F1_2(K4,ND02)))+E_NP2
(ND02)*700594);
1225 OpC_EW(J1) .. PlantOpCEW(J1) =E= ((59706*(sum(K2,F10_3(K2,J1))+sum(I1,F10_1(I1,
J1))+sum(I0,F10_2(I0,J1))))+E_EW(J1)*702435);
1227 OpC_NW(NW) .. PlantOpCNW(NW) =E= ((5126850*(sum(K2,F11_3(K2,NW))+sum(I1,F11_1(
I1,NW))+sum(I0,F11_2(I0,NW))))+E_NW(NW)*701316);
1229 OpC_MW(MW) .. PlantOpCMW(MW) =E= ((5126850*(sum(K2,F12_3(K2,MW))+sum(I1,F12_1(
I1,MW))+sum(I0,F12_2(I0,MW))))+E_MW(MW)*701316);
1231
*Red
1233 OpC1.. RedOpC1 =E= sum(K0, sum(I2, ((F0_1(K0,I2))*g*DH1(K0,I2)))+(DIST1(K0,I2)

```



```

      *((2.79*F0_1(K0, I2)))));
1235 OpC2.. RedOpC2 =E= sum(K0, sum(J01 ,((F0_2(K0, J01)*g*Dh2(K0, J01)))+(DIST2(K0,
      J01)*((2.79*F0_2(K0, J01))))));
      OpC3.. RedOpC3 =E= sum(K0, sum(ND01 ,((F0_3(K0, ND01)*g*Dh3(K0, ND01)))+(DIST3(K0
      ,ND01)*((2.79*F0_3(K0, ND01))))));
1237 OpC4.. RedOpC4 =E= sum(K4, sum(J02 ,((F1_1(K4, J02)*g*Dh4(K4, J02)))+(DIST4(K4,
      J02)*((2.79*F1_1(K4, J02))))));
1239 OpC5.. RedOpC5 =E= sum(K4, sum(ND02 ,((F1_2(K4, ND02)*g*Dh5(K4, ND02)))+(DIST5(K4
      ,ND02)*((2.79*F1_2(K4, ND02))))));
1241 OpC6.. RedOpC6 =E= sum(K5, sum(K0 ,((F2_1(K5, K0)*g*Dh6(K5, K0)))+(DIST6(K5, K0)
      *((2.79*F2_1(K5, K0))))));
      OpC7.. RedOpC7 =E= sum(K5, sum(ND03 ,((F2_2(K5, ND03)*g*Dh7(K5, ND03)))+(DIST7(K5
      ,ND03)*((2.79*F2_2(K5, ND03))))));
1243 OpC8.. RedOpC8 =E= sum(J01, sum(I1 ,((F3_1(J01, I1)*g*Dh8(J01, I1)))+(DIST8(J01,
      I1)*((2.79*F3_1(J01, I1))))));
1245 OpC9.. RedOpC9 =E= sum(J01, sum(I0 ,((F3_2(J01, I0)*g*Dh9(J01, I0)))+(DIST9(J01,
      I0)*((2.79*F3_2(J01, I0))))));
      OpC10.. RedOpC10 =E= sum(J01, sum(I2 ,((F3_3(J01, I2)*g*Dh10(J01, I2)))+(DIST10(
      J01, I2)*((2.79*F3_3(J01, I2))))));
1247 OpC11.. RedOpC11 =E= sum(J01, sum(K1 ,((F3_4(J01, K1)*g*Dh11(J01, K1)))+(DIST11(
      J01, K1)*((2.79*F3_4(J01, K1))))));
1249 OpC12.. RedOpC12 =E= sum(J02, sum(I1 ,((F4_1(J02, I1)*g*Dh12(J02, I1)))+(DIST12(
      J02, I1)*((2.79*F4_1(J02, I1))))));
      OpC13.. RedOpC13 =E= sum(J02, sum(I0 ,((F4_2(J02, I0)*g*Dh13(J02, I0)))+(DIST13(
      J02, I0)*((2.79*F4_2(J02, I0))))));
1251 OpC14.. RedOpC14 =E= sum(J02, sum(I2 ,((F4_3(J02, I2)*g*Dh14(J02, I2)))+(DIST14(
      J02, I2)*((2.79*F4_3(J02, I2))))));
      OpC15.. RedOpC15 =E= sum(J02, sum(K1 ,((F4_4(J02, K1)*g*Dh15(J02, K1)))+(DIST15(
      J02, K1)*((2.79*F4_4(J02, K1))))));
1253 OpC16.. RedOpC16 =E= sum(ND01, sum(I1 ,((F5_1(ND01, I1)*g*Dh16(ND01, I1)))+(
      DIST16(ND01, I1)*((2.79*F5_1(ND01, I1))))));
1255 OpC17.. RedOpC17 =E= sum(ND01, sum(I0 ,((F5_2(ND01, I0)*g*Dh17(ND01, I0)))+(
      DIST17(ND01, I0)*((2.79*F5_2(ND01, I0))))));
      OpC18.. RedOpC18 =E= sum(ND01, sum(I2 ,((F5_3(ND01, I2)*g*Dh18(ND01, I2)))+(
      DIST18(ND01, I2)*((2.79*F5_3(ND01, I2))))));
1257 OpC19.. RedOpC19 =E= sum(ND01, sum(K1 ,((F5_4(ND01, K1)*g*Dh19(ND01, K1)))+(
      DIST19(ND01, K1)*((2.79*F5_4(ND01, K1))))));
1259 OpC20.. RedOpC20 =E= sum(ND02, sum(I1 ,((F6_1(ND02, I1)*g*Dh20(ND02, I1)))+(
      DIST20(ND02, I1)*((2.79*F6_1(ND02, I1))))));
      OpC21.. RedOpC21 =E= sum(ND02, sum(I0 ,((F6_2(ND02, I0)*g*Dh21(ND02, I0)))+(
      DIST21(ND02, I0)*((2.79*F6_2(ND02, I0))))));
1261 OpC22.. RedOpC22 =E= sum(ND02, sum(I2 ,((F6_3(ND02, I2)*g*Dh22(ND02, I2)))+(
      DIST22(ND02, I2)*((2.79*F6_3(ND02, I2))))));
      OpC23.. RedOpC23 =E= sum(ND02, sum(K1 ,((F6_4(ND02, K1)*g*Dh23(ND02, K1)))+(
      DIST23(ND02, K1)*((2.79*F6_4(ND02, K1))))));
1263 OpC24.. RedOpC24 =E= sum(ND03, sum(I1 ,((F7_1(ND03, I1)*g*Dh24(ND03, I1)))+(
      DIST24(ND03, I1)*((2.79*F7_1(ND03, I1))))));
1265 OpC25.. RedOpC25 =E= sum(ND03, sum(I0 ,((F7_2(ND03, I0)*g*Dh25(ND03, I0)))+(
      DIST25(ND03, I0)*((2.79*F7_2(ND03, I0))))));

```

OpC26.. RedOpC26 =E= sum(ND03, sum(I2, ((F7_3(ND03, I2) *g*DH26(ND03, I2)))+(DIST26(ND03, I2) * ((2.79 *F7_3(ND03, I2))))));

1267 OpC27.. RedOpC27 =E= sum(ND03, sum(K1, ((F7_4(ND03, K1) *g*DH27(ND03, K1)))+(DIST27(ND03, K1) * ((2.79 *F7_4(ND03, K1))))));

1269 OpC28.. RedOpC28 =E= sum(K1, sum(I1, ((F8_1(K1, I1) *g*DH28(K1, I1)))+(DIST28(K1, I1) * ((2.79 *F8_1(K1, I1))))));

OpC29.. RedOpC29 =E= sum(K1, sum(I0, ((F8_2(K1, I0) *g*DH29(K1, I0)))+(DIST29(K1, I0) * ((2.79 *F8_2(K1, I0))))));

1271 OpC30.. RedOpC30 =E= sum(K1, sum(I2, ((F8_3(K1, I2) *g*DH30(K1, I2)))+(DIST30(K1, I2) * ((2.79 *F8_3(K1, I2))))));

1273 OpC31.. RedOpC31 =E= sum(I1, sum(K2, ((F9_1(I1, K2) *g*DH31(I1, K2)))+(DIST31(I1, K2) * ((2.79 *F9_1(I1, K2))))));

OpC32.. RedOpC32 =E= sum(I0, sum(K2, ((F9_2(I0, K2) *g*DH32(I0, K2)))+(DIST32(I0, K2) * ((2.79 *F9_2(I0, K2))))));

1275 OpC33.. RedOpC33 =E= sum(J1, sum(I1, ((F10_1(I1, J1) *g*DH33(I1, J1)))+(DIST33(I1, J1) * ((2.79 *F10_1(I1, J1))))));

1277 OpC34.. RedOpC34 =E= sum(J1, sum(I0, ((F10_2(I0, J1) *g*DH34(I0, J1)))+(DIST34(I0, J1) * ((2.79 *F10_2(I0, J1))))));

OpC35.. RedOpC35 =E= sum(J1, sum(K2, ((F10_3(K2, J1) *g*DH35(K2, J1)))+(DIST35(K2, J1) * ((2.79 *F10_3(K2, J1))))));

1279 OpC36.. RedOpC36 =E= sum(NW, sum(I1, ((F11_1(I1, NW) *g*DH36(I1, NW)))+(DIST36(I1, NW) * ((2.79 *F11_1(I1, NW))))));

1281 OpC37.. RedOpC37 =E= sum(NW, sum(I0, ((F11_2(I0, NW) *g*DH37(I0, NW)))+(DIST37(I0, NW) * ((2.79 *F11_2(I0, NW))))));

OpC38.. RedOpC38 =E= sum(NW, sum(K2, ((F11_3(K2, NW) *g*DH38(K2, NW)))+(DIST38(K2, NW) * ((2.79 *F11_3(K2, NW))))));

1283 OpC39.. RedOpC39 =E= sum(MW, sum(I1, ((F12_1(I1, MW) *g*DH39(I1, MW)))+(DIST39(I1, MW) * ((2.79 *F12_1(I1, MW))))));

1285 OpC40.. RedOpC40 =E= sum(MW, sum(I0, ((F12_2(I0, MW) *g*DH40(I0, MW)))+(DIST40(I0, MW) * ((2.79 *F12_2(I0, MW))))));

OpC41.. RedOpC41 =E= sum(MW, sum(K2, ((F12_3(K2, MW) *g*DH41(K2, MW)))+(DIST41(K2, MW) * ((2.79 *F12_3(K2, MW))))));

1287 OpC42.. RedOpC42 =E= sum(J1, sum(K0, ((F13_1(J1, K0) *g*DH42(J1, K0)))+(DIST42(J1, K0) * ((2.79 *F13_1(J1, K0))))));

1289 OpC43.. RedOpC43 =E= sum(I2, sum(K0, ((F13_2(I2, K0) *g*DH43(I2, K0)))+(DIST43(I2, K0) * ((2.79 *F13_2(I2, K0))))));

1291 OpC44.. RedOpC44 =E= sum(NW, sum(K1, ((F14_1(NW, K1) *g*DH44(NW, K1)))+(DIST44(NW, K1) * ((2.79 *F14_1(NW, K1))))));

OpC45.. RedOpC45 =E= sum(NW, sum(I1, ((F14_2(NW, I1) *g*DH45(NW, I1)))+(DIST45(NW, I1) * ((2.79 *F14_2(NW, I1))))));

1293 OpC46.. RedOpC46 =E= sum(NW, sum(I2, ((F14_3(NW, I2) *g*DH46(NW, I2)))+(DIST46(NW, I2) * ((2.79 *F14_3(NW, I2))))));

OpC47.. RedOpC47 =E= sum(NW, sum(I0, ((F14_4(NW, I0) *g*DH47(NW, I0)))+(DIST47(NW, I0) * ((2.79 *F14_4(NW, I0))))));

1295 OpC48.. RedOpC48 =E= sum(MW, sum(K1, ((F15_1(MW, K1) *g*DH48(MW, K1)))+(DIST48(MW, K1) * ((2.79 *F15_1(MW, K1))))));

1297 OpC49.. RedOpC49 =E= sum(MW, sum(I1, ((F15_2(MW, I1) *g*DH49(MW, I1)))+(DIST49(MW, I1) * ((2.79 *F15_2(MW, I1))))));

```

OpC50.. RedOpC50 =E= sum(MW, sum(I2 ,((F15_3(MW, I2 )*g*DH50(MW, I2 ))+(DIST50(MW,
1299 OpC51.. RedOpC51 =E= sum(MW, sum(I0 ,((F15_4(MW, I0 )*g*DH51(MW, I0 ))+(DIST51(MW,
I0 )*((2.79*F15_4(MW, I0 ))))))));

1301 *NSIALACI[U+FFFD]N DE PLANTAS[AASFFD]ER[U+FFFD]AS
1303
1305 *Plantas de tratamiento
1307 CapC_ND01(ND01) .. PlantCapCND01(ND01) =E= 17100*sum(K0, F0_3(K0, ND01))+E_NP1(
ND01)*(57500+TerrND01(ND01));
1309 CapC_ND02(ND02) .. PlantCapCND02(ND02) =E= 3250000*sum(K4, F1_2(K4, ND02))+ E_NP2
(ND02)*(650000);
CapC_ND03(ND03) .. PlantCapCND03(ND03) =E= 17100*sum(K5, F2_2(K5, ND03))+E_NP3(
ND03)*(57500+TerrND03(ND03));
1311 CapC_NW(NW) .. PlantCapCNW(NW) =E= 5190000*(sum(K2, F11_3(K2, NW))+sum(I1 , F11_1(
I1 ,NW))+sum(I0 , F11_2(I0 ,NW)))+E_NW(NW)*(3290000+TerrNW(NW));
CapC_MW(MW) .. PlantCapCMW(MW) =E= 2880000*(sum(K2, F12_3(K2, MW))+sum(I1 , F12_1(
I1 ,MW))+sum(I0 , F12_2(I0 ,MW)))+E_MW(MW)*3150000;
1313 *Red
1315 CapC3.. RedCapC3 =E= sum(K0, sum(ND01, (9.13*DIST3(K0, ND01)*E_NP1(ND01))));
CapC5.. RedCapC5 =E= sum(K4, sum(ND02, (9.13*DIST5(K4, ND02)*E_NP2(ND02))));
1317 CapC7.. RedCapC7 =E= sum(K5, sum(ND03, (9.13*DIST7(K5, ND03)*E_NP3(ND03))));
1319 CapCNP1_1.. RedCapCNP1_EL =E= (9.13*DIST19('NP1_EL', 'PEAP10293')*E_NP1('NP1_EL
'));
CapCNP1_2.. RedCapCNP1_TC =E= (9.13*DIST19('NP1_TC', 'D_TC')*E_NP1('NP1_TC'));
1321 CapCNP2_1.. RedCapCNP2_TC =E= (9.13*DIST23('NP2_TC', 'D_TC')*E_NP2('NP2_TC'));
CapCNP2_2.. RedCapCNP2_EL =E= (9.13*DIST23('NP2_EL', 'PEAP10293')*E_NP2('NP2_EL
'));
CapCNP2_3.. RedCapCNP2_AF =E= (9.13*DIST23('NP2_AF', 'PEAP10894')*E_NP2('NP2_AF
'));
1323 CapCNP3_1.. RedCapCNP3_TC =E= (9.13*DIST27('NP3_TC', 'D_TC')*E_NP3('NP3_TC'));
1325 CapCNP3_2.. RedCapCNP3_EL =E= (9.13*DIST27('NP3_EL', 'D_EL')*E_NP3('NP3_EL'));
CapCNP3_3.. RedCapCNP3_AF =E= (9.13*DIST27('NP3_AF', 'D_AF')*E_NP3('NP3_AF'));
1327 CapCNW_11.. RedCapCNW_TC1 =E= (9.13*DIST38('PEAS10322', 'NW_TC')*E_NW('NW_TC'))
;
1329 CapCNW_12.. RedCapCNW_EL1 =E= (9.13*DIST38('R_EL', 'NW_EL')*E_NW('NW_EL'));
CapCNW_13.. RedCapCNW_AF1 =E= (9.13*DIST38('PEAS10332', 'NW_AF')*E_NW('NW_AF'))
;
1331 CapCNW_21.. RedCapCNW_TC2 =E= (9.13*DIST44('NW_TC', 'D_TC')*E_NW('NW_TC'));
1333 CapCNW_22.. RedCapCNW_EL2 =E= (9.13*DIST44('NW_EL', 'PEAP10293')*E_NW('NW_EL'))
;
CapCNW_23.. RedCapCNW_AF2 =E= (9.13*DIST44('NW_AF', 'PEAP10894')*E_NW('NW_AF'))
;
1335 CapCMW_1.. RedCapCMW_TC =E= (9.13*DIST48('MW_TC', 'PEAP10293')*E_MW('MW_TC'));
1337 CapCMW_2.. RedCapCMW_AASG =E= (9.13*DIST48('MW_AASG', 'PEAP10293')*E_MW('
MW_AASG'));
CapCMW_3.. RedCapCMW_AAB =E= (9.13*DIST48('MW_AAB', 'PEAP10893')*E_MW('MW_AAB'))

```

```

);
1339 CapCMW_4.. RedCapCMW_AALA =E= (9.13*DIST48('MW_AALA', 'PEAP10304')*E_MW('
    MW_AALA'));
CapCMW_5.. RedCapCMW_ESPC =E= (9.13*DIST48('MW_ESPC', 'PEAP10306')*E_MW('
    MW_ESPC'));
1341 PARTIALCOST1.. PC1 =E= RedOpC1+RedOpC2+RedOpC3+RedOpC4+RedOpC5+RedOpC6+RedOpC7
    +RedOpC8+RedOpC9+RedOpC10+RedOpC11+RedOpC12+RedOpC13+RedOpC14+RedOpC15+
    RedOpC16+RedOpC17+RedOpC18+RedOpC19+RedOpC20;
1343 PARTIALCOST2.. PC2 =E= RedOpC21+RedOpC22+RedOpC23+RedOpC24+RedOpC25+RedOpC26+
    RedOpC27+RedOpC28+RedOpC29+RedOpC30+RedOpC31+RedOpC32+RedOpC33+RedOpC34+
    RedOpC35+RedOpC36+RedOpC37+RedOpC38+RedOpC39+RedOpC40;
PARTIALCOST3.. PC3 =E= RedOpC41+RedOpC42+RedOpC43+RedOpC44+RedOpC45+RedOpC46+
    RedOpC47+RedOpC48+RedOpC49+RedOpC50+RedOpC51;
1345 RedOpCtotal.. RedOpC =E= T*E*(PC1+PC2+PC3);
1347 PlantOpCtotal.. PlantOpC =E= sum(J01, PlantOpCJ01(J01))+sum(ND01, PlantOpCND01(
    ND01))+sum(ND03, PlantOpCND03(ND03))+sum(J02, PlantOpCJ02(J02))+sum(ND02,
    PlantOpCND02(ND02))+sum(J1, PlantOpCEW(J1))+sum(NW, PlantOpCNW(NW))+sum(MW,
    PlantOpCMW(MW));
PlantCapCtotal.. PlantCapC =E= sum(ND01, PlantCapCND01(ND01))+sum(ND02,
    PlantCapCND02(ND02))+sum(ND03, PlantCapCND03(ND03))+sum(NW, PlantCapCNW(NW))+
    sum(MW, PlantCapCMW(MW));
1349 RedCapCtotal.. RedCapCt =E= RedCapC3+RedCapC5+RedCapC7+RedCapCMW_TC+
    RedCapCMW_AASG+RedCapCMW_AAB+RedCapCMW_AALA+RedCapCMW_ESPC+RedCapCNW_TC1+
    RedCapCNW_EL1+RedCapCNW_AF1+RedCapCNW_TC2+RedCapCNW_EL2+RedCapCNW_AF2+
    RedCapCNP1_EL+RedCapCNP1_TC+RedCapCNP2_TC+RedCapCNP2_EL+RedCapCNP2_AF+
    RedCapCNP3_TC+RedCapCNP3_EL+RedCapCNP3_AF;
1351 TotalCost.. TC =E= RedOpC+PlantOpC+PlantCapC+RedCapCt;
1353
1355 EQWC1.. WC1 =E= HuRL1-(0.7*(0.007319931022+0.009262552328+0.005233545604));
EQWC2.. WC2 =E= HuRV-(0.7*0.000472);
1357 EQAMB1.. (0.5*(WC1))+(0.5*(WC2)) =G= -0.0001;
1359 EQAMB2.. (0.5*(WC1))+(0.5*(WC2)) =L= 0.0001;
FOAMB.. AMB =E= (sum(K0, (sum(J01, F0_2(K0, J01))+sum(ND01, F0_3(K0, ND01))+sum(I2
    , F0_1(K0, I2)))))+(sum(K4, (sum(J02, F1_1(K4, J02))+sum(ND02, F1_2(K4, ND02)))));
1361
1363 FOb1.. FO1 =E= (AMB-3.141189)/(16.693696-3.141189);
FOb2.. FO2 =E= (TC-678437078.4)/(66268042574.3393-678437078.4);
1365 MO1.. FO1*w1 =L= gamma;
1367 MO2.. FO2*w2 =L= gamma;
1369
1371 MODEL ANTOEMONOWC / ALL / ;
OPTION RESLIM = 3000;
1373 OPTION LIMROW = 0 ;
OPTION LIMCOL = 0 ;
1375 OPTION MIP = cplex;
OPTION OptCR = 1E-10;

```

```

1377 SOLVE ANTOFMONOWC USING MIP MINIMIZING gamma;
1379
*execute_unload "multi00.gdx" TC.L AMB.L
1381 *execute 'gdxxrw.exe multi00.gdx o=multi0.xlsx var=TC.L rng=1!A1:C3'
*execute 'gdxxrw.exe multi00.gdx o=multi0.xlsx var=AMB.L rng=1!D1:F3'
1383
1385 execute_unload "resmulti.gdx" F0_1.L F0_2.L F0_3.L F1_1.L F1_2.L F2_1.L F2_2.L
F3_1.L F3_2.L F3_3.L F3_4.L F4_1.L F4_2.L F4_3.L F4_4.L
F5_1.L F5_2.L F5_3.L F5_4.L F6_1.L F6_2.L F6_3.L F6_4.L F7_1.L
1387 F7_2.L F7_3.L F7_4.L F8_1.L F8_2.L F8_3.L
F9_1.L F9_2.L F10_1.L F10_2.L F10_3.L F11_1.L F11_2.L F11_3.L
F12_1.L F12_2.L F12_3.L F13_1.L F13_2.L F13_3.L
F14_1.L F14_2.L F14_3.L F14_4.L F15_1.L F15_2.L F15_3.L F15_4.L
1389 F16_1.L F16_2.L F16_3.L F16_4.L F16_5.L F16_6.L F16_7.L F16_8.L
F16_9.L F16_10.L F16_11.L F16_12.L F16_13.L F16_14.L
1391 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F0_1.L rng=FlujosM0!A2:
F11'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F0_2.L rng=FlujosM0!G2:
1393 L11'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F0_3.L rng=FlujosM0!M2:
R11'
1395 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F1_1.L rng=FlujosM1!A2:
C4'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F1_2.L rng=FlujosM1!D2:
1397 H4'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F2_1.L rng=FlujosM2!A2:
K20'
1399 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F2_2.L rng=FlujosM2!L2:
R20'
1401 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F3_1.L rng=FlujosM3!A2:
L8'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F3_2.L rng=FlujosM3!M2:
1403 X8'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F3_3.L rng=FlujosM3!Y2:
AF8'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F3_4.L rng=FlujosM3!AG2:
1405 BG8'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F4_1.L rng=FlujosM4!A2:
L5'
1407 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F4_2.L rng=FlujosM4!M2:
X5'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F4_3.L rng=FlujosM4!Y2:
1409 AF5'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F4_4.L rng=FlujosM4!AG2:
BG5'
1411 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F5_1.L rng=FlujosM5!A2:
L6'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F5_2.L rng=FlujosM5!M2:

```

```

1413 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F5_3.L rng=FlujosM5!Y2:
      AF6'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F5_4.L rng=FlujosM5!AG2:
      BG6'
1415 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F6_1.L rng=FlujosM6!A2:
      L6'
1417 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F6_2.L rng=FlujosM6!M2:
      X6'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F6_3.L rng=FlujosM6!Y2:
      AF6'
1419 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F6_4.L rng=FlujosM6!AG2:
      BG6'
1421 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F7_1.L rng=FlujosM7!A2:
      L6'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F7_2.L rng=FlujosM7!M2:
      X6'
1423 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F7_3.L rng=FlujosM7!Y2:
      AF6'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F7_4.L rng=FlujosM7!AG2:
      BG6'
1425 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F8_1.L rng=FlujosM8!A2:
      L23'
1427 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F8_2.L rng=FlujosM8!M2:
      W23'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F8_3.L rng=FlujosM8!X2:
      AD23'
1429 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F9_1.L rng=FlujosM9!A2:
      Y12'
1431 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F9_2.L rng=FlujosM9!Z2:
      AX12'
1433 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F10_1.L rng=FlujosM10!A2
      :G12'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F10_2.L rng=FlujosM10!H2
      :O12'
1435 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F10_3.L rng=FlujosM10!P2
      :W26'
1437 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F11_1.L rng=FlujosM11!A2
      :E12'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F11_2.L rng=FlujosM11!F2
      :J12'
1439 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F11_3.L rng=FlujosM11!K2
      :O26'
1441 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F12_1.L rng=FlujosM12!A2
      :G12'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F12_2.L rng=FlujosM12!H2
      :O12'
1443 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F12_3.L rng=FlujosM12!P2
      :W26'

```

```

1445 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F13_1.L rng=FlujosM13!A2
      :K7'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F13_2.L rng=FlujosM13!L2
      :V7'
1447 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F13_3.L rng=FlujosM13!W2
      :AG7'

1449 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F14_1.L rng=FlujosM14!A2
      :V6'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F14_2.L rng=FlujosM14!W2
      :AH6'
1451 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F14_3.L rng=FlujosM14!
      AI2:AN6'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F14_4.L rng=FlujosM14!
      AO2:AY6'

1453 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F15_1.L rng=FlujosM15!A2
      :V7'
1455 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F15_2.L rng=FlujosM15!W2
      :AH7'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F15_3.L rng=FlujosM15!
      AI2:AN7'
1457 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F15_4.L rng=FlujosM15!
      AO2:AY7'

1459 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_1.L rng=FlujosM16!A2
      :C30'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_2.L rng=FlujosM16!D2
      :F30'
1461 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_3.L rng=FlujosM16!G2
      :I30'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_4.L rng=FlujosM16!J2
      :L30'
1463 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_5.L rng=FlujosM16!M2
      :O30'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_6.L rng=FlujosM16!P2
      :R30'
1465 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_7.L rng=FlujosM16!S2
      :U30'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_8.L rng=FlujosM16!V2
      :X30'
1467 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_9.L rng=FlujosM16!Y2
      :AA30'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_10.L rng=FlujosM16!
      AB2:AD30'
1469 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_11.L rng=FlujosM16!
      AE2:AG30'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_12.L rng=FlujosM16!
      AH2:AJ30'
1471 execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_13.L rng=FlujosM16!
      AK2:AM30'
execute 'gdxxrw.exe resmulti.gdx o=resmulti.xlsx var=F16_14.L rng=FlujosM16!
      AN2:AP30'

```

O.2. Atacama

El siguiente código es para el problema multi-objetivo de la región de Atacama, escrito en GAMS. Para obtener los mono objetivos se debe cambiar la función a minimizar, en el caso de los valores ideales, o maximizar, en el caso de los valores anti ideales.

```
1 $ONTEXT
3 El siguiente codigo corresponde a la resolucion del problema de Redes de Agua
   para la region de Antofagasta , Chile .
5 Codigo de Daniela Gormaz Cuevas para su proyecto de Tesis de Ingeniera Civil
   Quimica
7 $OFFTEXT
9 *****
   Sets
11     BSE origen de flujo subterraneo /Or/
13     K0 fuente natural /RCP1, RCP2, RCP3, RCP4, RH1, RH2, RH3, SUB/
15     J0 planta de potabilizacion PTAP-DWIP /EP1_ACDA, EP1_ACIO, EP1_ACPC,
   EP1_ACP, EP1_ACN, NONE/
17         set J01(J0) subset PTAP para fuente natural-PTOI /EP1_ACDA,
   EP1_ACIO, EP1_ACPC, EP1_ACP, EP1_ACN/
19         set J02(J0) subset PTAP desalinizacion /NONE/
21     I0 consumo domiciliario /CDCH1, CDCH2, CDCH3, CDCH4, CDCH5, CDCP1,
   CDCP2, CDCP3, CDCP4, CDCP5, CDCP6, CDCP7, CDH1, CDH2/
23     I1 consumo industrial /CICH1, CMCH1, CICP1, CIMALLCP, CMCP1, CMCP2,
   CIH1, CIGEN, CMH1/
25     I2 consumo agricola /CRCH1, CRCP1, CRCP2, CRCP3, CRCP4, CRCP5, CRH1,
   CRH2, CRH3, CRH4, CRH5, CRH6, CRH7, CRH8/
27     J1 planta de tratamiento de agua servida /EW_ACDA, EW_ACES, EW_ACC,
   EW_ACCO, EW_ACTA, EW_ACV, EW_ACF/
29     K1 distribucion /PEAP30103, PEAP30108, PEAP30110, PEAP30111,
   PEAP30115, PEAP30116, PEAP30112, PEAP30113, PEAP30114, PEAP30201,
   PEAP30301, PEAP30302, PEAP30303, PEAP30314, PEAP30322, PEAP30327, PEAP30346
   , PEAP30347, PEAP30348, PEAP30355, PEAP30356, PEAP30358, PEAP30360,
   PEAP30362, PEAP30364, PEAP30367, PEAP30371, PEAP30372, PEAP30507, PEAP30511
   , PEAP30514, PEAP30517, D_CH, D_CP, D_H/
   K2 recoleccion /PEAS35101, PEAS35102, PEAS35103, PEAS35104, PEAS35105
   , PEAS35106, PEAS35111, PEAS35112, PEAS35113, PEAS35114, PEAS35116,
   PEAS35117, R_CH, R_CP, R_H/
   K3 sumidero /S/
   K4 fuente ficticia que representa el mar /MR/
   K5 fuente ficticia que representa la lluvia /LLCP4, LLCP3, LLH1, LLH2
   , LLH3, DMK, CNY, CNYALB, PAR, CNYLZ, MANFL, JDLG/
   ND0 nueva planta de potabilizacion /NP1_CP, NP1_H, NP2_CH, NP2_CP,
   NP2_H, NP3_CH, NP3_CP, NP3_H/
       set ND01(ND0) subset PTAP para fuente natural /NP1_CP, NP1_H/
       set ND02(ND0) subset PTAP para desalination /NP2_CH, NP2_CP,
   NP2_H/
       set ND03(ND0) subset PTAP para tratamiento de agua lluvia /
   NP3_CH, NP3_CP, NP3_H/
   NW nueva planta de tratamiento de agua servida con calidad de salida
   de agua potable /NW_CH, NW_CP, NW_H/
   MW planta de tratamiento de agua servida modificada con calidad de
```



```

31 salida de agua potable /MW_ACDA, MW_ACES, MW_ACC, MW_ACCO, MW_ACTA, MW_ACV,
    MW_ACF/
* RS puntos de medicion de lluvia fuera de fuentes naturales
seleccionadas , fuente ficticia de lluvia /TCQ4, CUPO, TCQ1, RGR, ET/
;
33 *****
Parameters
35 M big M /1000000/
mm litle M /0.02/
37 BHum /0.7/
g gravedad [m-s] /9.8/
39 T tiempo anual de operacion [h-año]/8760/
E costo operacional [USD-kWh] /0.104/
41 w1 peso de la funcion objetivo ambiental /0.5/
w2 peso de la funcion objetivo economica /0.5/
43
*EL parametro BHum cambia para cada escenario
45
47 *Parametros asociados con las demandas de los nodos
DDA0(I0) tabla con demandas de consumo domiciliario
49 /CDCH1 0.023
CDCH2 0.001
51 CDCH3 0.014
CDCH4 0.001
53 CDCH5 0.012
CDCP1 0.008
55 CDCP2 0.035
CDCP3 0.001
57 CDCP4 0.008
CDCP5 0.008
59 CDCP6 0.303
CDCP7 0.002
61 CDH1 0.044
CDH2 0.102/
63 DDA1(I1) tabla con demandas de consumo industrial
/CICH1 0.000175000
65 CMCH1 0.401000000
CICP1 0.007610000
67 CIMALLCP 0.003300000
CMCP1 0.668333333
69 CMCP2 0.200500000
CIH1 0.046600000
71 CIGEN 0.000508000
CMH1 0.334166667/
73 DDA2(I2) tabla con demandas de consumo agricola
/CRCH1 0.00085
75 CRCP1 0.0242
CRCP2 0.21223
77 CRCP3 1.528800
CRCP4 0.19141
79 CRCP5 6.06574
CRH1 0.54668
81 CRH2 0.46955
CRH3 0.16808
83 CRH4 0.16409

```

85 CRH5 0.410860
 CRH6 0.06717
 87 CRH7 1.075030
 CRH8 0.275/
 89
 91 *Parametros asociados con las perdidas de agua
 WLK0(K0) fraccion de perdida para fuente natural
 /RCP1 0.2
 93 RCP2 0.2
 RCP3 0.2
 95 RCP4 0.2
 RH1 0.2
 97 RH2 0.2
 RH3 0.2
 99 SUB 0.2/
 101 WLJ01(J01) fraccion de perdida para planta de potabilizacion de
 fuente natural
 /EP1_ACDA 0.1
 103 EP1_ACIO 0.1
 EP1_ACPC 0.1
 105 EP1_ACP 0.1
 EP1_ACN 0.1/
 107
 WLJ02(J02) fraccion de perdida para planta de potabilizacion de
 desalinizacion
 109 /NONE 0.1/
 111 WLI0(I0) fraccion de perdida para consumo domiciliario
 /CDCH1 0.1
 113 CDCH2 0.1
 CDCH3 0.1
 115 CDCH4 0.1
 CDCH5 0.1
 117 CDCP1 0.1
 CDCP2 0.1
 119 CDCP3 0.1
 CDCP4 0.1
 121 CDCP5 0.1
 CDCP6 0.1
 123 CDCP7 0.1
 CDH1 0.1
 125 CDH2 0.1/
 127 WLI1(I1) fraccion de perdida para consumo industrial
 /CICH1 0.2
 129 CMCH1 0.2
 CICP1 0.2
 131 CIMALLCP 0.2
 CMCP1 0.2
 133 CMCP2 0.2
 CIH1 0.2
 135 CIGEN 0.2
 CMHI 0.2/
 137

139	WLI2(I2) fraccion de perdida para consumo agricola
	/CRCH1 0.5
	CRCP1 0.5
141	CRCP2 0.5
	CRCP3 0.5
143	CRCP4 0.5
	CRCP5 0.5
145	CRH1 0.5
	CRH2 0.5
147	CRH3 0.5
	CRH4 0.5
149	CRH5 0.5
	CRH6 0.5
151	CRH7 0.5
	CRH8 0.5/
153	
	WLJ1(J1) fraccion de perdida para planta de tratamiento de agua
	servidas
155	/EW_ACDA 0.1
	EW_ACES 0.1
157	EW_ACC 0.1
	EW_ACCO 0.1
159	EW_ACTA 0.1
	EW_ACV 0.1
161	EW_ACF 0.1/
163	
	WLK1(K1) fraccion de perdida para distribucion
	/PEAP30103 0.2
165	PEAP30108 0.2
	PEAP30110 0.2
167	PEAP30111 0.2
	PEAP301115 0.2
169	PEAP301116 0.2
	PEAP30112 0.2
171	PEAP30113 0.2
	PEAP30114 0.2
173	PEAP30201 0.2
	PEAP30301 0.2
175	PEAP30302 0.2
	PEAP30303 0.2
177	PEAP30314 0.2
	PEAP30322 0.2
179	PEAP30327 0.2
	PEAP30346 0.2
181	PEAP30347 0.2
	PEAP30348 0.2
183	PEAP30355 0.2
	PEAP30356 0.2
185	PEAP30358 0.2
	PEAP30360 0.2
187	PEAP30362 0.2
	PEAP30364 0.2
189	PEAP30367 0.2
	PEAP30371 0.2
191	PEAP30372 0.2
	PEAP30507 0.2

193 PEAP30511 0.2
 PEAP30514 0.2
 195 PEAP30517 0.2
 D_CH 0.2
 197 D_CP 0.2
 D_H 0.2/
 199
 WLK2(K2) fraccion de perdida para recoleccion
 201 /PEAS35101 0.15
 PEAS35102 0.15
 203 PEAS35103 0.15
 PEAS35104 0.15
 205 PEAS35105 0.15
 PEAS35106 0.15
 207 PEAS35111 0.15
 PEAS35112 0.15
 209 PEAS35113 0.15
 PEAS35114 0.15
 211 PEAS35116 0.15
 PEAS35117 0.15
 213 R_CH 0.15
 R_CP 0.15
 215 R_H 0.15/
 217
 WLND01(ND01) fraccion de perdida para planta de potabilizacion nuevas
 de fuente natural
 /NP1_CP 0.1
 219 NP1_H 0.1/
 221
 WLND02(ND02) fraccion de perdida para planta de potabilizacion nueva
 de desalinizacion
 /NP2_CP 0.1
 223 NP2_CH 0.1
 NP2_H 0.1/
 225
 WLND03(ND03) fraccion de perdida para planta de potabilizacion nueva
 de aguas lluvias
 /NP3_CP 0.1
 227 NP3_CH 0.1
 229 NP3_H 0.1/
 231
 WLNW(NW) fraccion de perdida para planta de tratamiento de agua
 servida nueva
 /NW_CP 0.1
 233 NW_CH 0.1
 NW_H 0.1/
 235
 WLMW(MW) fraccion de perdida para planta de tratamiento de agua
 servida modificada
 /MW_ACDA 0.1
 237 MW_ACES 0.1
 239 MW_ACC 0.1
 MW_ACCO 0.1
 241 MW_ACTA 0.1
 MW_ACV 0.1
 243 MW_ACF 0.1/

```

245 *Parametros asociados con el flujo actual de tratamiento de las plantas [m3/s]
247     AFJ01(J01) flujo actual de planta de potabilizacion de fuente natural
249     /EP1_ACDA 0.056
249     EP1_ACIO 0.001
251     EP1_ACPC 0.492
251     EP1_ACP 0.476
251     EP1_ACN 0.168/
253
253     AFJ02(J02) flujo actual de planta de potabilizacion para
253     desalinizacion
255     /NONE 0/
257
257     AFJ1(J1) flujo actual de planta de tratamiento de agua servidas
259     /EW_ACDA 0.025
259     EW_ACES 0.021
261     EW_ACC 0.034
261     EW_ACCO 0.010
263     EW_ACTA 0.280
263     EW_ACV 0.03
265     EW_ACF 0.03/
265
265     AFMW(MW) flujo actual de planta de tratamiento de agua servidas
265     modificadas
267     /MW_ACDA 0.025
267     MW_ACES 0.021
269     MW_ACC 0.034
269     MW_ACCO 0.010
271     MW_ACTA 0.280
271     MW_ACV 0.03
273     MW_ACF 0.03/
273
275 *Parametros asociados con terreno
275     TerrND01(ND01) Terreno para nuevas PTAP convencional [USD*(U+FFD)]
277     /NP1_CP 585375
277     NP1_H 919875/
279
279     TerrND02(ND02) Terreno para nuevas PTAP desalinizadoras [USD*(U+FFD)]
281     /NP2_CH 1254375
281     NP2_CP 585375
283     NP2_H 919875/
283
283     TerrND03(ND03) Terreno para nuevas PTAP tratamiento de aguas lluvias
285     [USD*(U+FFD)]
285     /NP3_CH 752625
287     NP3_CP 351225
287     NP3_H 551925/
289
289     TerrNW(NW) Terreno para nuevas PTAS calidad potable [USD*(U+FFD)]
291     /NW_CH 2007000
291     NW_CP 936600
293     NW_H 1471800/
293
293 ;
295 Parameter DH1(K0,I2)
295 $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH1 rng=DH1(K0,I2)!A1:E10 output =

```

```

    DH1.gdx
297 $GDXIN DH1.gdx
    $LOAD DH1
299 $GDXIN

301 Parameter DH2(K0,J01)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH2 rng=DH2(K0,J01)!A1:E10 output =
        DH2.gdx
303 $GDXIN DH2.gdx
    $LOAD DH2
305 $GDXIN

307 Parameter DH3(K0,ND01)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH3 rng=DH3(K0,ND01)!A1:C10 output =
        DH3.gdx
309 $GDXIN DH3.gdx
    $LOAD DH3
311 $GDXIN

313 Parameter DH4(K4,J02)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH4 rng=DH4(K4,J02)!A1:C2 output =
        DH4.gdx
315 $GDXIN DH4.gdx
    $LOAD DH4
317 $GDXIN

319 Parameter DH5(K4,ND02)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH5 rng=DH5(K4,ND02)!A1:D2 output =
        DH5.gdx
321 $GDXIN DH5.gdx
    $LOAD DH5
323 $GDXIN

325 Parameter DH6(K5,K0)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH6 rng=DH6(K5,K0)!A1:D10 output =
        DH6.gdx
327 $GDXIN DH6.gdx
    $LOAD DH6
329 $GDXIN

331 Parameter DH7(K5,ND03)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH7 rng=DH7(K5,ND03)!A1:D10 output =
        DH7.gdx
333 $GDXIN DH7.gdx
    $LOAD DH7
335 $GDXIN

337 Parameter DH8(J01,I1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH8 rng=DH8(J01,I1)!A1:K5 output =
        DH8.gdx
339 $GDXIN DH8.gdx
    $LOAD DH8
341 $GDXIN

343 Parameter DH9(J01,I0)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH9 rng=DH9(J01,I0)!A1:J5 output =

```

```

    DH9.gdx
345 $GDXIN DH9.gdx
    $LOAD DH9
347 $GDXIN

349 Parameter DH10(J01,I2)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH10 rng=DH10(J01,I2)!A1:E5 output =
        DH10.gdx
351 $GDXIN DH10.gdx
    $LOAD DH10
353 $GDXIN

355 Parameter DH11(J01,K1)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH11 rng=DH11(J01,K1)!A1:U5 output =
        DH11.gdx
357 $GDXIN DH11.gdx
    $LOAD DH11
359 $GDXIN

361 Parameter DH12(J02,I1)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH12 rng=DH12(J02,I1)!A1:K3 output =
        DH12.gdx
363 $GDXIN DH12.gdx
    $LOAD DH12
365 $GDXIN

367 Parameter DH13(J02,I0)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH13 rng=DH13(J02,I0)!A1:J3 output =
        DH13.gdx
369 $GDXIN DH13.gdx
    $LOAD DH13
371 $GDXIN

373 Parameter DH14(J02,I2)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH14 rng=DH14(J02,I2)!A1:E3 output =
        DH14.gdx
375 $GDXIN DH14.gdx
    $LOAD DH14
377 $GDXIN

379 Parameter DH15(J02,K1)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH15 rng=DH15(J02,K1)!A1:U3 output =
        DH15.gdx
381 $GDXIN DH15.gdx
    $LOAD DH15
383 $GDXIN

385 Parameter DH16(ND01,I1)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH16 rng=DH16(ND01,I1)!A1:K3 output
        =DH16.gdx
387 $GDXIN DH16.gdx
    $LOAD DH16
389 $GDXIN

391 Parameter DH17(ND01,I0)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH17 rng=DH17(ND01,I0)!A1:J3 output

```

```

    =DH17.gdx
393 $GDXIN DH17.gdx
    $LOAD DH17
395 $GDXIN

397 Parameter DH18(ND01,I2)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH18 rng=DH18(ND01,I2)!A1:E3 output
        =DH18.gdx
399 $GDXIN DH18.gdx
    $LOAD DH18
401 $GDXIN

403 Parameter DH19(ND01,K1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH19 rng=DH19(ND01,K1)!A1:U3 output
        =DH19.gdx
405 $GDXIN DH19.gdx
    $LOAD DH19
407 $GDXIN

409 Parameter DH20(ND02,I1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH20 rng=DH20(ND02,I1)!A1:K4 output
        =DH20.gdx
411 $GDXIN DH20.gdx
    $LOAD DH20
413 $GDXIN

415 Parameter DH21(ND02,I0)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH21 rng=DH21(ND02,I0)!A1:J4 output
        =DH21.gdx
417 $GDXIN DH21.gdx
    $LOAD DH21
419 $GDXIN

421 Parameter DH22(ND02,I2)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH22 rng=DH22(ND02,I2)!A1:E4 output
        =DH22.gdx
423 $GDXIN DH22.gdx
    $LOAD DH22
425 $GDXIN

427 Parameter DH23(ND02,K1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH23 rng=DH23(ND02,K1)!A1:U4 output
        =DH23.gdx
429 $GDXIN DH23.gdx
    $LOAD DH23
431 $GDXIN

433 Parameter DH24(ND03,I1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH24 rng=DH24(ND03,I1)!A1:K4 output
        =DH24.gdx
435 $GDXIN DH24.gdx
    $LOAD DH24
437 $GDXIN

439 Parameter DH25(ND03,I0)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH25 rng=DH25(ND03,I0)!A1:J4 output

```



```

    =DH25.gdx
441 $GDXIN DH25.gdx
    $LOAD DH25
443 $GDXIN

445 Parameter DH26(ND03,I2)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH26 rng=DH26(ND03,I2)!A1:E4 output
    =DH26.gdx
447 $GDXIN DH26.gdx
    $LOAD DH26
449 $GDXIN

451 Parameter DH27(ND03,K1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH27 rng=DH27(ND03,K1)!A1:U4 output
    =DH27.gdx
453 $GDXIN DH27.gdx
    $LOAD DH27
455 $GDXIN

457 Parameter DH28(K1,I1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH28 rng=DH28(K1,I1)!A1:K21 output =
    DH28.gdx
459 $GDXIN DH28.gdx
    $LOAD DH28
461 $GDXIN

463 Parameter DH29(K1,I0)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH29 rng=DH29(K1,I0)!A1:J21 output =
    DH29.gdx
465 $GDXIN DH29.gdx
    $LOAD DH29
467 $GDXIN

469 Parameter DH30(K1,I2)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH30 rng=DH30(K1,I2)!A1:E21 output =
    DH30.gdx
471 $GDXIN DH30.gdx
    $LOAD DH30
473 $GDXIN

475 Parameter DH31(I1,K2)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH31 rng=DH31(I1,K2)!A1:X11 output =
    DH31.gdx
477 $GDXIN DH31.gdx
    $LOAD DH31
479 $GDXIN

481 Parameter DH32(I0,K2)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH32 rng=DH32(I0,K2)!A1:X10 output =
    DH32.gdx
483 $GDXIN DH32.gdx
    $LOAD DH32
485 $GDXIN

487 Parameter DH33(I1,J1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH33 rng=DH33(I1,J1)!A1:F11 output =

```

```

    DH33.gdx
489 $GDXIN DH33.gdx
    $LOAD DH33
491 $GDXIN

493 Parameter DH34(I0 ,J1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH34 rng=DH34(I0 ,J1)!A1:F10 output =
        DH34.gdx
495 $GDXIN DH34.gdx
    $LOAD DH34
497 $GDXIN

499 Parameter DH35(K2 ,J1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH35 rng=DH35(K2 ,J1)!A1:F24 output =
        DH35.gdx
501 $GDXIN DH35.gdx
    $LOAD DH35
503 $GDXIN

505 Parameter DH36(I1 ,NW)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH36 rng=DH36(I1 ,NW)!A1:D11 output =
        DH36.gdx
507 $GDXIN DH36.gdx
    $LOAD DH36
509 $GDXIN

511 Parameter DH37(I0 ,NW)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH37 rng=DH37(I0 ,NW)!A1:D10 output =
        DH37.gdx
513 $GDXIN DH37.gdx
    $LOAD DH37
515 $GDXIN

517 Parameter DH38(K2 ,NW)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH38 rng=DH38(K2 ,NW)!A1:D24 output =
        DH38.gdx
519 $GDXIN DH38.gdx
    $LOAD DH38
521 $GDXIN

523 Parameter DH39(I1 ,MW)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH39 rng=DH1(K0 ,I2)!A1:F11 output =
        DH39.gdx
525 $GDXIN DH39.gdx
    $LOAD DH39
527 $GDXIN

529 Parameter DH40(I0 ,MW)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH40 rng=DH40(I0 ,MW)!A1:F10 output =
        DH40.gdx
531 $GDXIN DH40.gdx
    $LOAD DH40
533 $GDXIN

535 Parameter DH41(K2 ,MW)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH41 rng=DH41(K2 ,MW)!A1:F24 output =

```

```

    DH41.gdx
537 $GDXIN DH41.gdx
    $LOAD DH41
539 $GDXIN

541 Parameter DH42(J1,K0)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH42 rng=DH42(J1,K0)!A1:J6 output =
        DH42.gdx
543 $GDXIN DH42.gdx
    $LOAD DH42
545 $GDXIN

547 Parameter DH43(I2,K0)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH43 rng=DH43(I2,K0)!A1:J5 output =
        DH43.gdx
549 $GDXIN DH43.gdx
    $LOAD DH43
551 $GDXIN

553 Parameter DH44(NW,K1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH44 rng=DH44(NW,K1)!A1:U4 output =
        DH44.gdx
555 $GDXIN DH44.gdx
    $LOAD DH44
557 $GDXIN

559 Parameter DH45(NW,I1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH45 rng=DH45(NW,I1)!A1:K4 output =
        DH45.gdx
561 $GDXIN DH45.gdx
    $LOAD DH45
563 $GDXIN

565 Parameter DH46(NW,I2)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH46 rng=DH46(NW,I2)!A1:E4 output =
        DH46.gdx
567 $GDXIN DH46.gdx
    $LOAD DH46
569 $GDXIN

571 Parameter DH47(NW,I0)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH47 rng=DH47(NW,I0)!A1:J4 output =
        DH47.gdx
573 $GDXIN DH47.gdx
    $LOAD DH47
575 $GDXIN

577 Parameter DH48(MW,K1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH48 rng=DH48(MW,K1)!A1:U6 output =
        DH48.gdx
579 $GDXIN DH48.gdx
    $LOAD DH48
581 $GDXIN

583 Parameter DH49(MW,I1)
    $call GDXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH49 rng=DH49(MW,I1)!A1:K6 output =

```

```

    DH49.gdx
585 $GDXIN DH49.gdx
    $LOAD DH49
587 $GDXIN

    Parameter DH50(MW,I2)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH50 rng=DH50(MW,I2)!A1:E6 output =
        DH50.gdx
591 $GDXIN DH50.gdx
    $LOAD DH50
593 $GDXIN

    Parameter DH51(MW,I0)
    $call GDXXRW Tablas_Alturas_Atac.xlsx par=DH51 rng=DH51(MW,I0)!A1:J6 output =
        DH51.gdx
597 $GDXIN DH51.gdx
    $LOAD DH51
599 $GDXIN

601
603
    Parameter DIST1(K0,I2)
605 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST1 rng=DIST1(K0,I2)!A1:E10
        output =DIST1.gdx
    $GDXIN DIST1.gdx
607 $LOAD DIST1
    $GDXIN

609
    Parameter DIST2(K0,J01)
611 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST2 rng=DIST2(K0,J01)!A1:E10
        output =DIST2.gdx
    $GDXIN DIST2.gdx
613 $LOAD DIST2
    $GDXIN

615
    Parameter DIST3(K0,ND01)
617 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST3 rng=DIST3(K0,ND01)!A1:C10
        output =DIST3.gdx
    $GDXIN DIST3.gdx
619 $LOAD DIST3
    $GDXIN

621
    Parameter DIST4(K4,J02)
623 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST4 rng=DIST4(K4,J02)!A1:C2
        output =DIST4.gdx
    $GDXIN DIST4.gdx
625 $LOAD DIST4
    $GDXIN

627
    Parameter DIST5(K4,ND02)
629 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST5 rng=DIST5(K4,ND02)!A1:D2
        output =DIST5.gdx
    $GDXIN DIST5.gdx
631 $LOAD DIST5
    $GDXIN

```

```

633 Parameter DIST6(K5,K0)
635 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST6 rng=DIST6(K5,K0)!A1:D10
      output =DIST6.gdx
      $GDXIN DIST6.gdx
637 $LOAD DIST6
      $GDXIN
639 Parameter DIST7(K5,ND03)
641 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST7 rng=DIST7(K5,ND03)!A1:D10
      output =DIST7.gdx
      $GDXIN DIST7.gdx
643 $LOAD DIST7
      $GDXIN
645 Parameter DIST8(J01,I1)
647 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST8 rng=DIST8(J01,I1)!A1:K5
      output =DIST8.gdx
      $GDXIN DIST8.gdx
649 $LOAD DIST8
      $GDXIN
651 Parameter DIST9(J01,I0)
653 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST9 rng=DIST9(J01,I0)!A1:J5
      output =DIST9.gdx
      $GDXIN DIST9.gdx
655 $LOAD DIST9
      $GDXIN
657 Parameter DIST10(J01,I2)
659 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST10 rng=DIST10(J01,I2)!A1:E5
      output =DIST10.gdx
      $GDXIN DIST10.gdx
661 $LOAD DIST10
      $GDXIN
663 Parameter DIST11(J01,K1)
665 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST11 rng=DIST11(J01,K1)!A1:U5
      output =DIST11.gdx
      $GDXIN DIST11.gdx
667 $LOAD DIST11
      $GDXIN
669 Parameter DIST12(J02,I1)
671 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST12 rng=DIST12(J02,I1)!A1:K3
      output =DIST12.gdx
      $GDXIN DIST12.gdx
673 $LOAD DIST12
      $GDXIN
675 Parameter DIST13(J02,I0)
677 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST13 rng=DIST13(J02,I0)!A1:J3
      output =DIST13.gdx
      $GDXIN DIST13.gdx
679 $LOAD DIST13
      $GDXIN

```

```

681 Parameter DIST14(J02,I2)
683 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST14 rng=DIST14(J02,I2)!A1:E3
        output =DIST14.gdx
$GDXIN DIST14.gdx
685 $LOAD DIST14
$GDXIN

687 Parameter DIST15(J02,K1)
689 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST15 rng=DIST15(J02,K1)!A1:U3
        output =DIST15.gdx
$GDXIN DIST15.gdx
691 $LOAD DIST15
$GDXIN

693 Parameter DIST16(ND01,I1)
695 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST16 rng=DIST16(ND01,I1)!A1:K3
        output =DIST16.gdx
$GDXIN DIST16.gdx
697 $LOAD DIST16
$GDXIN

699 Parameter DIST17(ND01,I0)
701 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST17 rng=DIST17(ND01,I0)!A1:J3
        output =DIST17.gdx
$GDXIN DIST17.gdx
703 $LOAD DIST17
$GDXIN

705 Parameter DIST18(ND01,I2)
707 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST18 rng=DIST18(ND01,I2)!A1:E3
        output =DIST18.gdx
$GDXIN DIST18.gdx
709 $LOAD DIST18
$GDXIN

711 Parameter DIST19(ND01,K1)
713 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST19 rng=DIST19(ND01,K1)!A1:U3
        output =DIST19.gdx
$GDXIN DIST19.gdx
715 $LOAD DIST19
$GDXIN

717 Parameter DIST20(ND02,I1)
719 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST20 rng=DIST20(ND02,I1)!A1:K4
        output =DIST20.gdx
$GDXIN DIST20.gdx
721 $LOAD DIST20
$GDXIN

723 Parameter DIST21(ND02,I0)
725 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST21 rng=DIST21(ND02,I0)!A1:J4
        output =DIST21.gdx
$GDXIN DIST21.gdx
727 $LOAD DIST21
$GDXIN

```

```

729 | Parameter DIST22(ND02,I2)
731 | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST22 rng=DIST22(ND02,I2)!A1:E4
      |   output =DIST22.gdx
      | $GDXIN DIST22.gdx
733 | $LOAD DIST22
      | $GDXIN
735 |
737 | Parameter DIST23(ND02,K1)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST23 rng=DIST23(ND02,K1)!A1:U4
      |   output =DIST23.gdx
      | $GDXIN DIST23.gdx
739 | $LOAD DIST23
      | $GDXIN
741 |
743 | Parameter DIST24(ND03,I1)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST24 rng=DIST24(ND03,I1)!A1:K4
      |   output =DIST24.gdx
      | $GDXIN DIST24.gdx
745 | $LOAD DIST24
      | $GDXIN
747 |
749 | Parameter DIST25(ND03,I0)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST25 rng=DIST25(ND03,I0)!A1:J4
      |   output =DIST25.gdx
      | $GDXIN DIST25.gdx
751 | $LOAD DIST25
      | $GDXIN
753 |
755 | Parameter DIST26(ND03,I2)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST26 rng=DIST26(ND03,I2)!A1:E4
      |   output =DIST26.gdx
      | $GDXIN DIST26.gdx
757 | $LOAD DIST26
      | $GDXIN
759 |
761 | Parameter DIST27(ND03,K1)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST27 rng=DIST27(ND03,K1)!A1:U4
      |   output =DIST27.gdx
      | $GDXIN DIST27.gdx
763 | $LOAD DIST27
      | $GDXIN
765 |
767 | Parameter DIST28(K1,I1)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST28 rng=DIST28(K1,I1)!A1:K21
      |   output =DIST28.gdx
      | $GDXIN DIST28.gdx
769 | $LOAD DIST28
      | $GDXIN
771 |
773 | Parameter DIST29(K1,I0)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST29 rng=DIST29(K1,I0)!A1:J21
      |   output =DIST29.gdx
      | $GDXIN DIST29.gdx
775 | $LOAD DIST29
      | $GDXIN

```

```

777 Parameter DIST30(K1,I2)
779 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST30 rng=DIST30(K1,I2)!A1:E21
      output =DIST30.gdx
      $GDXIN DIST30.gdx
781 $LOAD DIST30
      $GDXIN
783
783 Parameter DIST31(I1,K2)
785 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST31 rng=DIST31(I1,K2)!A1:X11
      output =DIST31.gdx
      $GDXIN DIST31.gdx
787 $LOAD DIST31
      $GDXIN
789
789 Parameter DIST32(I0,K2)
791 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST32 rng=DIST32(I0,K2)!A1:X10
      output =DIST32.gdx
      $GDXIN DIST32.gdx
793 $LOAD DIST32
      $GDXIN
795
795 Parameter DIST33(I1,J1)
797 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST33 rng=DIST33(I1,J1)!A1:F11
      output =DIST33.gdx
      $GDXIN DIST33.gdx
799 $LOAD DIST33
      $GDXIN
801
801 Parameter DIST34(I0,J1)
803 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST34 rng=DIST34(I0,J1)!A1:F10
      output =DIST34.gdx
      $GDXIN DIST34.gdx
805 $LOAD DIST34
      $GDXIN
807
807 Parameter DIST35(K2,J1)
809 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST35 rng=DIST35(K2,J1)!A1:F24
      output =DIST35.gdx
      $GDXIN DIST35.gdx
811 $LOAD DIST35
      $GDXIN
813
813 Parameter DIST36(I1,NW)
815 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST36 rng=DIST36(I1,NW)!A1:D11
      output =DIST36.gdx
      $GDXIN DIST36.gdx
817 $LOAD DIST36
      $GDXIN
819
819 Parameter DIST37(I0,NW)
821 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST37 rng=DIST37(I0,NW)!A1:D10
      output =DIST37.gdx
      $GDXIN DIST37.gdx
823 $LOAD DIST37
      $GDXIN

```



```

825 Parameter DIST38(K2,NW)
827 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST38 rng=DIST38(K2,NW)!A1:D24
      output =DIST38.gdx
      $GDXIN DIST38.gdx
829 $LOAD DIST38
      $GDXIN

831 Parameter DIST39(I1,MW)
833 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST39 rng=DIST1(K0,I2)!A1:F11
      output =DIST39.gdx
      $GDXIN DIST39.gdx
835 $LOAD DIST39
      $GDXIN

837 Parameter DIST40(I0,MW)
839 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST40 rng=DIST40(I0,MW)!A1:F10
      output =DIST40.gdx
      $GDXIN DIST40.gdx
841 $LOAD DIST40
      $GDXIN

843 Parameter DIST41(K2,MW)
845 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST41 rng=DIST41(K2,MW)!A1:F24
      output =DIST41.gdx
      $GDXIN DIST41.gdx
847 $LOAD DIST41
      $GDXIN

849 Parameter DIST42(J1,K0)
851 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST42 rng=DIST42(J1,K0)!A1:J6
      output =DIST42.gdx
      $GDXIN DIST42.gdx
853 $LOAD DIST42
      $GDXIN

855 Parameter DIST43(I2,K0)
857 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST43 rng=DIST43(I2,K0)!A1:J5
      output =DIST43.gdx
      $GDXIN DIST43.gdx
859 $LOAD DIST43
      $GDXIN

861 Parameter DIST44(NW,K1)
863 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST44 rng=DIST44(NW,K1)!A1:U4
      output =DIST44.gdx
      $GDXIN DIST44.gdx
865 $LOAD DIST44
      $GDXIN

867 Parameter DIST45(NW,I1)
869 $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST45 rng=DIST45(NW,I1)!A1:K4
      output =DIST45.gdx
      $GDXIN DIST45.gdx
871 $LOAD DIST45
      $GDXIN

```

```

873 | Parameter DIST46(NW,I2)
875 | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST46 rng=DIST46(NW,I2)!A1:E4
      | output =DIST46.gdx
      | $GDXIN DIST46.gdx
877 | $LOAD DIST46
      | $GDXIN
879 |
881 | Parameter DIST47(NW,I0)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST47 rng=DIST47(NW,I0)!A1:J4
      | output =DIST47.gdx
      | $GDXIN DIST47.gdx
883 | $LOAD DIST47
      | $GDXIN
885 |
887 | Parameter DIST48(MW,K1)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST48 rng=DIST48(MW,K1)!A1:U6
      | output =DIST48.gdx
      | $GDXIN DIST48.gdx
889 | $LOAD DIST48
      | $GDXIN
891 |
893 | Parameter DIST49(MW,I1)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST49 rng=DIST49(MW,I1)!A1:K6
      | output =DIST49.gdx
      | $GDXIN DIST49.gdx
895 | $LOAD DIST49
      | $GDXIN
897 |
899 | Parameter DIST50(MW,I2)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST50 rng=DIST50(MW,I2)!A1:E6
      | output =DIST50.gdx
      | $GDXIN DIST50.gdx
901 | $LOAD DIST50
      | $GDXIN
903 |
905 | Parameter DIST51(MW,I0)
      | $call GDXXRW Tablas_Distancias_Atac.xlsx par=DIST51 rng=DIST51(MW,I0)!A1:J6
      | output =DIST51.gdx
      | $GDXIN DIST51.gdx
907 | $LOAD DIST51
      | $GDXIN
909 | *****
      | Positive variable
911 |
913 |
915 | *Variables para el balance de masa de Fuente natural
      | F0_1(K0,I2) Flujo desde fuente natural hasta consumo agricola
      | F0_2(K0,J01) Flujo desde fuente natural hasta EP1
917 | F0_3(K0,ND01) Flujo desde fuente natural hasta ND01
919 |
921 | *Variables para los flujos que salen del mar
      | F1_1(K4,J02) Flujo desde el mar hasta EP2

```

923 F1_2(K4,ND02) Flujo desde el mar hasta ND02

925 *Variables para los flujos provenientes de la lluvia
 F2_1(K5,K0) Flujo desde lluvia hasta fuente natural

927 F2_2(K5,ND03) Flujo desde lluvia hasta ND03

929 *Variables para **balance** de masa de planta de tratamiento de agua potable
 existente
 F3_1(J01,I1) Flujo desde EP1 hasta consumo industrial

931 F3_2(J01,I0) Flujo desde EP1 hasta consumo domiciliario
 F3_3(J01,I2) Flujo desde EP1 hasta consumo agricola

933 F3_4(J01,K1) Flujo desde EP1 hasta distribucion

935 *Variables para **balance** de masa de planta desalinizadora existente
 F4_1(J02,I1) Flujo desde EP2 hasta consumo industrial

937 F4_2(J02,I0) Flujo desde EP2 hasta consumo domiciliario
 F4_3(J02,I2) Flujo desde EP2 hasta consumo agricola

939 F4_4(J02,K1) Flujo desde EP2 hasta distribucion

941 *Variables para **balance** de masa de planta de tratamiento de agua potable de
 fuente natural nueva
 F5_1(ND01,I1) Flujo desde NP1 hasta consumo industrial

943 F5_2(ND01,I0) Flujo desde NP1 hasta consumo domiciliario
 F5_3(ND01,I2) Flujo desde NP1 hasta consumo agricola

945 F5_4(ND01,K1) Flujo desde NP1 hasta distribucion

947 *Variables para **balance** de masa de planta desalinizadora nueva
 F6_1(ND02,I1) Flujo desde NP2 hasta consumo industrial

949 F6_2(ND02,I0) Flujo desde NP2 hasta consumo domiciliario
 F6_3(ND02,I2) Flujo desde NP2 hasta consumo agricola

951 F6_4(ND02,K1) Flujo desde NP2 hasta distribucion

953 *Variables para **balance** de masa de planta de tratamiento de agua lluvia nueva
 F7_1(ND03,I1) Flujo desde NP3 hasta consumo industrial

955 F7_2(ND03,I0) Flujo desde NP3 hasta consumo domiciliario
 F7_3(ND03,I2) Flujo desde NP3 hasta consumo agricola

957 F7_4(ND03,K1) Flujo desde NP3 hasta distribucion

959 *Variables para **balance** de masa de distribucion
 F8_1(K1,I1) Flujo desde distribucion hasta consumo industrial

961 F8_2(K1,I0) Flujo desde distribucion hasta consumo domiciliario
 F8_3(K1,I2) Flujo desde distribucion hasta consumo agricola

963

965 *Variables para **balance** de masa de recoleccion
 F9_1(I1,K2) Flujo desde consumo industrial hasta recoleccion
 F9_2(I0,K2) Flujo desde consumo domiciliario hasta recoleccion

967

*Variables para **balance** de masa de plantas de tratamiento de agua servida
 existentes
 F10_1(I1,J1) Flujo desde consumo industrial hasta EW

969 F10_2(I0,J1) Flujo desde consumo domiciliario hasta EW

971 F10_3(K2,J1) Flujo desde recoleccion hasta EW

973 *Variables para **balance** de masa de plantas de tratamiento de agua servida
 nuevas
 F11_1(I1,NW) Flujo desde consumo industrial hasta NW

975 F11_2(I0 ,NW) Flujo desde consumo domiciliario hasta NW
F11_3(K2,NW) Flujo desde recoleccion hasta NW

977 *Variables para **balance** de masa de plantas de tratamiento de agua servida modificadas

979 F12_1(I1 ,MW) Flujo desde consumo industrial hasta MW
F12_2(I0 ,MW) Flujo desde consumo domiciliario hasta MW
981 F12_3(K2,MW) Flujo desde recoleccion hasta MW

983 *Variables que van a descarga

F13_1(J1 ,K0) Flujo desde EW hasta fuente natural
985 F13_2(I2 ,K0) Flujo desde consumo agricola hasta fuente natural
F13_3(BSE,K0) Flujo ficticio en fuentes subterranas que no se carga por lluvias

987 *Variables para **balance** de masa de plantas de tratamiento de agua servidas nuevas

989 F14_1(NW,K1) Flujo desde NW hasta distribucion
F14_2(NW, I1) Flujo desde NW hasta consumo industrial
991 F14_3(NW, I2) Flujo desde NW hasta consumo agricola
F14_4(NW, I0) Flujo desde NW hasta consumo domiciliario

993 *Variables para **balance** de masa de plantas de tratamiento de agua servidas modificadas

995 F15_1(MW,K1) Flujo desde MW hasta distribucion
F15_2(MW, I1) Flujo desde MW hasta consumo industrial
997 F15_3(MW, I2) Flujo desde MW hasta consumo agricola
F15_4(MW, I0) Flujo desde MW hasta consumo domiciliario

999 *Variables que van a sumidero

1001 F16_1(K0,K3)
F16_2(J01 ,K3)
1003 F16_3(J02 ,K3)
F16_4(ND01,K3)
1005 F16_5(ND02,K3)
F16_6(ND03,K3)
1007 F16_7(K1,K3)
F16_8(I1 ,K3)
1009 F16_9(I0 ,K3)
F16_10(I2 ,K3)
1011 F16_11(K2,K3)
F16_12(J1 ,K3)
1013 F16_13(NW,K3)
F16_14(MW,K3)

1015 *Otras variables
HuRCP4, HuRCP3, HuRCP2, HuRCP1, HuRH3, HuRH2, HuRH1, lm
1017 WC1, WC2

1019 *Variables de costo
PlantOpCJ01(J01) , PlantOpCND01(ND01) , PlantOpCND03(ND03) , PlantOpCJ02(J02) ,
PlantOpCND02(ND02) , PlantOpCEW(J1) , PlantOpCNW(NW) , PlantOpCMW(MW)
1021 RedOpC1, RedOpC2, RedOpC3, RedOpC4, RedOpC5, RedOpC6, RedOpC7, RedOpC8,
RedOpC9, RedOpC10
RedOpC10, RedOpC11, RedOpC12, RedOpC13, RedOpC14, RedOpC15, RedOpC16, RedOpC17
, RedOpC18, RedOpC19
1023 RedOpC20, RedOpC21, RedOpC22, RedOpC23, RedOpC24, RedOpC25, RedOpC26, RedOpC27

```

, RedOpC28, RedOpC29
RedOpC30, RedOpC31, RedOpC32, RedOpC33, RedOpC34, RedOpC35, RedOpC36, RedOpC37
, RedOpC38, RedOpC39
1025 RedOpC40, RedOpC41, RedOpC42, RedOpC43, RedOpC44, RedOpC45, RedOpC46, RedOpC47
, RedOpC48, RedOpC49, RedOpC50, RedOpC51
PC1, PC2, PC3
1027
PlantCapCND01(ND01), PlantCapCND02(ND02), PlantCapCND03(ND03), PlantCapCNW(NW)
, PlantCapCMW(MW)
1029 RedCapC3, RedCapC5, RedCapC7, RedCapCNP1_CP, RedCapCNP1_H, RedCapCNP2_CH,
RedCapCNP2_CP, RedCapCNP2_H, RedCapCNP3_CH, RedCapCNP3_CP, RedCapCNP3_H,
RedCapCNW_CH1, RedCapCNW_CP1, RedCapCNW_H1, RedCapCNW_CH2, RedCapCNW_CP2,
RedCapCNW_H2
RedCapCMW_ACDA, RedCapCMW_ACES, RedCapCMW_ACC, RedCapCMW_ACCO, RedCapCMW_ACTA,
RedCapCMW_ACV, RedCapCMW_ACF
1031
RedOpC, PlantOpC, PlantCapC, RedCapCt
1033
;
1035
*****
1037 Binary variable E_EP1(J01), E_EP2(J02), E_EW(J1), E_NP1(ND01), E_NP2(ND02),
E_NP3(ND03), E_NW(NW), E_MW(MW) ;
1039
*****
Free variable AMB, TC, gamma, FO1, FO2
1041
;
1043
*****
1045 Equations BMRCP4, BMRCP3, BMRCP2, BMRCP1, BMRH3, BMRH2, BMRH1, BMSUB, BMEP1(
J01), BMEP2(J02), BMNP1(ND01), BMNP2(ND02), BMNP3(ND03), BMDIST(K1), BMCA(
I2), BMCD(I0), BMCI(I1), BMREC(K2), BMEW(J1), BMNW(NW), BMMW(MW)
WLFN(K0), WLEP1(J01), WLEP2(J02), WLNP1(ND01), WLNP2(ND02), WLNP3(
ND03), WLDIS(K1), WLCI(I1), WLCD(I0), WLCA(I2), WLRECC(K2), WLEW(J1), WLNW1
(NW), WLMW1(MW), eqDDAI2(I2), eqDDAI0(I0), eqDDAI1(I1), eq2DDAI2(I2),
eq2DDAI0(I0), eq2DDAI1(I1)
1047 DIM1J01(J01), DIM2J01(J01), DIM1J02(J02), DIM2J02(J02), DIM1EW(J1),
DIM2EW(J1), DIM1MW(MW), DIM2MW(MW), EN1NP1(ND01), EN2NP1(ND01), EN1NP2(ND02)
), EN2NP2(ND02), EN1NP3(ND03), EN2NP3(ND03), EN1NW(NW), EN2NW(NW)
UBI(MW, J1), EQWC1, EQWC2, EQAMB1, EQAMB2
1049 * MAXR_RCP4, MAXR_RCP3, MAXR_RH3, MAXR_RH2, MAXR_RH1
MAXR_RCP2, MAXR_RCP1, MAXR_SUB, CONRCP4_1, CONRCP4_2, CONRCP4_3,
CONRCP4_4, CONRCP4_5, CONRCP4_6, CONRCP4_7, CONRCP4_8, CONRCP4_9,
CONRCP4_10, CONRCP4_11, CONRCP4_12
1051 CONRCP3_1, CONRCP3_2, CONRCP3_3, CONRCP3_4, CONRCP3_5, CONRCP3_6,
CONRCP3_7, CONRCP3_8, CONRCP3_9, CONRCP3_10, CONRCP3_11, CONRCP3_12,
CONRH3_1, CONRH3_2, CONRH3_3, CONRH3_4, CONRH3_5, CONRH3_6, CONRH3_7,
CONRH3_8, CONRH3_9, CONRH3_10, CONRH3_11, CONRH3_12
CONRH2_1, CONRH2_2, CONRH2_3, CONRH2_4, CONRH2_5, CONRH2_6, CONRH2_7
, CONRH2_8, CONRH2_9, CONRH2_10, CONRH2_11, CONRH2_12, CONRH1_1, CONRH1_2,
CONRH1_3, CONRH1_4, CONRH1_5, CONRH1_6, CONRH1_7, CONRH1_8, CONRH1_9,
CONRH1_10, CONRH1_11, CONRH1_12
1053 MAXLL_LLCP4, MAXLL_LLCP3, MAXLL_LLH3, MAXLL_LLH2, MAXLL_LLH1,
MAXLL_DMK, MAXLL_CNY, MAXLL_CNYALB, MAXLL_PAR, MAXLL_CNYLZ, MAXLL_MANFL,
MAXLL_JDLG, MAXBSE

```

```

OpC_J01(J01), OpC_ND01(ND01), OpC_ND03(ND03), OpC_J02(J02), OpC_ND02
(ND02), OpC_EW(J1), OpC_NW(NW), OpC_MW(MW)
1055 OpC1, OpC2, OpC3, OpC4, OpC5, OpC6, OpC7, OpC8, OpC9, OpC10, OpC11,
OpC12, OpC13, OpC14, OpC15, OpC16, OpC17, OpC18, OpC19, OpC20, OpC21, OpC22
, OpC23, OpC24, OpC25, OpC26, OpC27, OpC28, OpC29
OpC30, OpC31, OpC32, OpC33, OpC34, OpC35, OpC36, OpC37, OpC38, OpC39
, OpC40, OpC41, OpC42, OpC43, OpC44, OpC45, OpC46, OpC47, OpC48, OpC49,
OpC50, OpC51, PARTIALCOST1, PARTIALCOST2, PARTIALCOST3, TotalCost
1057 CapC_ND01(ND01), CapC_ND02(ND02), CapC_ND03(ND03), CapC_NW(NW),
CapC_MW(MW), RedOpCtotal, PlantOpCtotal, PlantCapCtotal
CapC3, CapC5, CapC7, CapCNP1_1, CapCNP1_2, CapCNP2_1, CapCNP2_2,
CapCNP2_3, CapCNP3_1, CapCNP3_2, CapCNP3_3, CapCNW_11, CapCNW_12, CapCNW_13
, CapCNW_21, CapCNW_22, CapCNW_23, CapCMW_1, CapCMW_2, CapCMW_3, CapCMW_4,
CapCMW_5, CapCMW_6, CapCMW_7
1059 RedCapCtotal, Desc, Desc2, BARR1(K1), BARR2(I2), BARR3(I0), BARR4(I1
), FOAMB, SUB1, RESCON
FOb1, FOb2, MO1, MO2
1061 ;
;
1063
*eq2.. sum(K0, sum(I4121, F11_121(K0, I4121)))+ sum(I4122, F11_122(K0, I4122))+ sum
(J01, F12_1(K0, J01))+sum(J02, F12_2(K0, J02))+sum(I22, F13(K0, I22))+sum(I3,
F14(K0, I3))+sum(ND01, F15_1(K0, ND01))+sum(ND02, F15_2(K0, ND02))) =E= G0 ;
1065 *BMGlob.. sum(K0, sum(I4121, F11_121(K0, I4121)))+ sum(I4122, F11_122(K0, I4122))+
sum(J01, F12_1(K0, J01))+sum(J02, F12_2(K0, J02))+sum(I22, F13(K0, I22))+sum(I3,
F14(K0, I3))+sum(ND01, F15_1(K0, ND01))+sum(ND02, F15_2(K0, ND02))) =E= sum(K22
, (sum(I3, F42(I3, K22))+sum(I21, F43(I21, K22))+sum(I22, F43_2(I22, K22))))+sum
(K21, (sum(J2122, F41_122(J2122, K21))+ sum(J2112, F41_112(J2112, K21))+sum(J11,
F44_1(J11, K21))+sum(J12, F44_2(J12, K21))+sum(NW41, FN7_1(NW41, K21))+sum(
NW42, FN7_2(NW42, K21))))+ sum(K3, (sum(J01, F82_1(J01, K3))+ sum(J02, F82_2(J02
, K3))+sum(I4121, F81_121(I4121, K3))+sum(I4122, F81_122(I4122, K3))+ sum(
I4111, F81_111(I4111, K3))+sum(I4112, F81_112(I4112, K3))+sum(I42, F81_2(I42, K3)
))+sum(I1, F87(I1, K3))+sum(I0, F86(I0, K3))+sum(I3, F84(I3, K3))+sum(I21, F83_1(
I21, K3))+sum(I22, F83_2(I22, K3))+sum(J2121, F85_121(J2121, K3))+sum(J2122,
F85_122(J2122, K3))+sum(J2111, F85_111(J2111, K3))+sum(J2112, F85_112(J2112, K3)
))+ sum(J22, F85_2(J22, K3))+sum(J11, F88_1(J11, K3))+sum(J12, F88_2(J12, K3))+sum
(K4, F89(K4, K3))+sum(K5, F810(K5, K3))+sum(ND01, F811_1(ND01, K3))+sum(ND02,
F811_2(ND02, K3))+sum(NW11, F812_1(NW11, K3))+sum(NW12, F812_2(NW12, K3))+
sum(NW21, F813_1(NW21, K3))+sum(NW22, F813_2(NW22, K3))+ sum(NW31, F814_1(NW31,
K3))+ sum(NW32, F814_2(NW32, K3))+sum(NW41, F815_1(NW41, K3))+ sum(NW42,
F815_2(NW42, K3))+ sum(MW11, F816_1(MW11, K3))+sum(MW12, F816_2(MW12, K3))+sum(
MW21, F817_1(MW21, K3))+sum(MW22, F817_2(MW22, K3))+sum(MW31, F818_1(MW31, K3))+
sum(MW32, F818_2(MW32, K3))) ;

1067 * Las siguientes ecuaciones son para el balance de masa en fuentes naturales
BMRCp4.. HuRCP4 =E= sum(K5, F2_1(K5, 'RCP4'))+sum(J1, F13_1(J1, 'RCP4'))+sum(I2,
F13_2(I2, 'RCP4'))-sum(I2, F0_1('RCP4', I2))-sum(J01, F0_2('RCP4', J01))-sum(
ND01, F0_3('RCP4', ND01))-sum(K3, F16_1('RCP4', K3));
1069 BMRCp3.. HuRCP3 =E= sum(K5, F2_1(K5, 'RCP3'))+sum(J1, F13_1(J1, 'RCP3'))+sum(I2,
F13_2(I2, 'RCP3'))+HuRCP4-sum(I2, F0_1('RCP3', I2))-sum(J01, F0_2('RCP3', J01))-
sum(ND01, F0_3('RCP3', ND01))-sum(K3, F16_1('RCP3', K3));
BMRCp2.. HuRCP2 =E= sum(K5, F2_1(K5, 'RCP2'))+sum(J1, F13_1(J1, 'RCP2'))+sum(I2,
F13_2(I2, 'RCP2'))+HuRCP3-sum(I2, F0_1('RCP2', I2))-sum(J01, F0_2('RCP2', J01))-
sum(ND01, F0_3('RCP2', ND01))-sum(K3, F16_1('RCP2', K3));
1071 BMRCp1.. HuRCP1 =E= sum(K5, F2_1(K5, 'RCP1'))+sum(J1, F13_1(J1, 'RCP1'))+sum(I2,
F13_2(I2, 'RCP1'))+HuRCP2-sum(I2, F0_1('RCP1', I2))-sum(J01, F0_2('RCP1', J01))-

```

```

sum(ND01,F0_3('RCP1',ND01))-sum(K3,F16_1('RCP1',K3));
BMRH3.. HuRH3 =E= sum(K5,F2_1(K5,'RH3'))+sum(J1,F13_1(J1,'RH3'))+sum(I2,F13_2(
I2,'RH3'))-sum(I2,F0_1('RH3',I2))-sum(J01,F0_2('RH3',J01))-sum(ND01,F0_3('
RH3',ND01))-sum(K3,F16_1('RH3',K3));
1073 BMRH2.. HuRH2 =E= sum(K5,F2_1(K5,'RH2'))+sum(J1,F13_1(J1,'RH2'))+sum(I2,F13_2(
I2,'RH2'))+HuRH3-sum(I2,F0_1('RH2',I2))-sum(J01,F0_2('RH2',J01))-sum(ND01,
F0_3('RH2',ND01))-sum(K3,F16_1('RH2',K3));
BMRH1.. HuRH1 =E= sum(K5,F2_1(K5,'RH1'))+sum(J1,F13_1(J1,'RH1'))+sum(I2,F13_2(
I2,'RH1'))+HuRH2-sum(I2,F0_1('RH1',I2))-sum(J01,F0_2('RH1',J01))-sum(ND01,
F0_3('RH1',ND01))-sum(K3,F16_1('RH1',K3));
1075 BMSUB.. sum(I2,F13_2(I2,'SUB')) + sum(BSE,F13_3(BSE,'SUB'))=E= sum(I2,F0_1('
SUB',I2))+sum(J01,F0_2('SUB',J01))+sum(ND01,F0_3('SUB',ND01))+sum(K3,F16_1(
'SUB',K3)) ;

1077 *Rest sub
SUB1.. sum(I2,F13_2(I2,'RCP4'))+sum(I2,F13_2(I2,'RCP3'))+sum(I2,F13_2(I2,'RCP2
'))+sum(I2,F13_2(I2,'RCP1'))+sum(I2,F13_2(I2,'RH3'))+sum(I2,F13_2(I2,'RH2'))
)+sum(I2,F13_2(I2,'RH1'))=E=0;
1079

1081 *Las siguientes ecuaciones son para el balance de masa en plantas de
potabilizacion existentes
BMEP1(J01).. sum(K0,F0_2(K0,J01)) =E= sum(I1,F3_1(J01,I1))+sum(I0,F3_2(J01,
I0))+sum(I2,F3_3(J01,I2))+sum(K1,F3_4(J01,K1))+sum(K3,F16_2(J01,K3));
1083 BMEP2(J02).. sum(K4,F1_1(K4,J02)) =E= sum(I1,F4_1(J02,I1))+sum(I0,F4_2(J02,
I0))+sum(I2,F4_3(J02,I2))+sum(K1,F4_4(J02,K1))+sum(K3,F16_3(J02,K3));

1085 *Las siguientes ecuaciones son para el balance de masa en plantas de
potabilizacion nuevas
BMNP1(ND01).. sum(K0,F0_3(K0,ND01)) =E= sum(I1,F5_1(ND01,I1))+sum(I0,F5_2(
ND01,I0))+sum(I2,F5_3(ND01,I2))+sum(K1,F5_4(ND01,K1))+sum(K3,F16_4(ND01,K3)
);
1087 BMNP2(ND02).. sum(K4,F1_2(K4,ND02)) =E= sum(I1,F6_1(ND02,I1))+sum(I0,F6_2(
ND02,I0))+sum(I2,F6_3(ND02,I2))+sum(K1,F6_4(ND02,K1))+sum(K3,F16_5(ND02,K3)
);
BMNP3(ND03).. sum(K5,F2_2(K5,ND03)) =E= sum(I1,F7_1(ND03,I1))+sum(I0,F7_2(
ND03,I0))+sum(I2,F7_3(ND03,I2))+sum(K1,F7_4(ND03,K1))+sum(K3,F16_6(ND03,K3)
);
1089

1091 *La siguiente ecuacion es para el balance de masa en distribucion
BMDIST(K1).. sum(J01,F3_4(J01,K1))+sum(J02,F4_4(J02,K1))+sum(ND01,F5_4(ND01,K1
))+sum(ND02,F6_4(ND02,K1))+sum(ND03,F7_4(ND03,K1))+sum(NW,F14_1(NW,K1))+sum
(MW,F15_1(MW,K1)) =E= sum(I1,F8_1(K1,I1))+sum(I0,F8_2(K1,I0))+sum(I2,F8_3(
K1,I2))+sum(K3,F16_7(K1,K3));

1093 *La siguiente ecuacion es para el balance de masa del consumo agricola
BMCA(I2).. sum(J01,F3_3(J01,I2))+sum(J02,F4_3(J02,I2))+sum(ND01,F5_3(ND01,I2)
)+sum(ND02,F6_3(ND02,I2))+sum(ND03,F7_3(ND03,I2))+sum(K1,F8_3(K1,I2))+sum(K0
,F0_1(K0,I2))+sum(NW,F14_3(NW,I2))+sum(MW,F15_3(MW,I2)) =E= sum(K0,F13_2(
I2,K0))+sum(K3,F16_10(I2,K3));
1095

1097 *La siguiente ecuacion es para el balance de masa del consumo domiciliario
BMCD(I0).. sum(J01,F3_2(J01,I0))+sum(J02,F4_2(J02,I0))+sum(ND01,F5_2(ND01,I0)
)+sum(ND02,F6_2(ND02,I0))+sum(ND03,F7_2(ND03,I0))+sum(K1,F8_2(K1,I0))+sum(NW
,F14_4(NW,I0))+sum(MW,F15_4(MW,I0)) =E= sum(K2,F9_2(I0,K2))+sum(J1,F10_2(
I0,J1))+sum(NW,F11_2(I0,NW))+sum(MW,F12_2(I0,MW))+sum(K3,F16_9(I0,K3));

```

1099 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa del consumo industrial

$$\text{BMCI}(I1) \dots \text{sum}(J01, F3_1(J01, I1)) + \text{sum}(J02, F4_1(J02, I1)) + \text{sum}(ND01, F5_1(ND01, I1)) \\ + \text{sum}(ND02, F6_1(ND02, I1)) + \text{sum}(ND03, F7_1(ND03, I1)) + \text{sum}(K1, F8_1(K1, I1)) + \text{sum}(NW, \\ F14_2(NW, I1)) + \text{sum}(MW, F15_2(MW, I1)) =E= \text{sum}(K2, F9_1(I1, K2)) + \text{sum}(J1, F10_1(I1, J1)) + \text{sum}(NW, F11_1(I1, NW)) + \text{sum}(MW, F12_1(I1, MW)) + \text{sum}(K3, F16_8(I1, K3));$$

1101 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa de recoleccion
1103
$$\text{BMREC}(K2) \dots \text{sum}(I1, F9_1(I1, K2)) + \text{sum}(I0, F9_2(I0, K2)) =E= \text{sum}(J1, F10_3(K2, J1)) \\ + \text{sum}(NW, F11_3(K2, NW)) + \text{sum}(MW, F12_3(K2, MW)) + \text{sum}(K3, F16_11(K2, K3));$$

1105 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa de plantas de tratamiento de
agua servida existentes
1107
$$\text{BMEW}(J1) \dots \text{sum}(K2, F10_3(K2, J1)) + \text{sum}(I1, F10_1(I1, J1)) + \text{sum}(I0, F10_2(I0, J1)) =E= \\ \text{sum}(K0, F13_1(J1, K0)) + \text{sum}(K3, F16_12(J1, K3));$$

1109 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa de plantas de tratamiento de
agua servida nuevas con calidad de salida potable
1111
$$\text{BMNW}(NW) \dots \text{sum}(K2, F11_3(K2, NW)) + \text{sum}(I1, F11_1(I1, NW)) + \text{sum}(I0, F11_2(I0, NW)) =E= \\ \text{sum}(K1, F14_1(NW, K1)) + \text{sum}(I1, F14_2(NW, I1)) + \text{sum}(I2, F14_3(NW, I2)) + \text{sum}(I0, F14_4(NW, I0)) \\ + \text{sum}(K3, F16_13(NW, K3));$$

1113 *La siguiente ecuacion es para el **balance** de masa en plantas de tratamiento de
agua servida modificadas con calidad de salida potable
1115
$$\text{BMW}(MW) \dots \text{sum}(K2, F12_3(K2, MW)) + \text{sum}(I1, F12_1(I1, MW)) + \text{sum}(I0, F12_2(I0, MW)) =E= \\ \text{sum}(K1, F15_1(MW, K1)) + \text{sum}(I1, F15_2(MW, I1)) + \text{sum}(I2, F15_3(MW, I2)) + \text{sum}(I0, F15_4(MW, I0)) \\ + \text{sum}(K3, F16_14(MW, K3));$$

1117 *Cumplimiento de demanda

$$\text{eqDDAI2}(I2) \dots \text{sum}(J01, F3_3(J01, I2)) + \text{sum}(J02, F4_3(J02, I2)) + \text{sum}(ND01, F5_3(ND01, I2)) \\ + \text{sum}(ND02, F6_3(ND02, I2)) + \text{sum}(ND03, F7_3(ND03, I2)) + \text{sum}(K1, F8_3(K1, I2)) + \text{sum}(K0, F0_1(K0, I2)) \\ + \text{sum}(NW, F14_3(NW, I2)) + \text{sum}(MW, F15_3(MW, I2)) =E= \text{DDA2}(I2);$$

1119
$$\text{eqDDAI0}(I0) \dots \text{sum}(J01, F3_2(J01, I0)) + \text{sum}(J02, F4_2(J02, I0)) + \text{sum}(ND01, F5_2(ND01, I0)) \\ + \text{sum}(ND02, F6_2(ND02, I0)) + \text{sum}(ND03, F7_2(ND03, I0)) + \text{sum}(K1, F8_2(K1, I0)) + \text{sum}(NW, F14_4(NW, I0)) \\ + \text{sum}(MW, F15_4(MW, I0)) =E= \text{DDA0}(I0);$$

1121
$$\text{eqDDAI1}(I1) \dots \text{sum}(J01, F3_1(J01, I1)) + \text{sum}(J02, F4_1(J02, I1)) + \text{sum}(ND01, F5_1(ND01, I1)) \\ + \text{sum}(ND02, F6_1(ND02, I1)) + \text{sum}(ND03, F7_1(ND03, I1)) + \text{sum}(K1, F8_1(K1, I1)) + \text{sum}(NW, F14_2(NW, I1)) \\ + \text{sum}(MW, F15_2(MW, I1)) =E= \text{DDA1}(I1);$$

1123 *Limite para sobre demanda

$$\text{eq2DDAI2}(I2) \dots \text{sum}(J01, F3_3(J01, I2)) + \text{sum}(J02, F4_3(J02, I2)) + \text{sum}(ND01, F5_3(ND01, I2)) \\ + \text{sum}(ND02, F6_3(ND02, I2)) + \text{sum}(ND03, F7_3(ND03, I2)) + \text{sum}(K1, F8_3(K1, I2)) + \text{sum}(K0, F0_1(K0, I2)) \\ + \text{sum}(NW, F14_3(NW, I2)) + \text{sum}(MW, F15_3(MW, I2)) =L= \text{DDA2}(I2) + 0.5;$$

1125
$$\text{eq2DDAI0}(I0) \dots \text{sum}(J01, F3_2(J01, I0)) + \text{sum}(J02, F4_2(J02, I0)) + \text{sum}(ND01, F5_2(ND01, I0)) \\ + \text{sum}(ND02, F6_2(ND02, I0)) + \text{sum}(ND03, F7_2(ND03, I0)) + \text{sum}(K1, F8_2(K1, I0)) + \text{sum}(NW, F14_4(NW, I0)) \\ + \text{sum}(MW, F15_4(MW, I0)) =L= \text{DDA0}(I0) + 0.5;$$

1127
$$\text{eq2DDAI1}(I1) \dots \text{sum}(J01, F3_1(J01, I1)) + \text{sum}(J02, F4_1(J02, I1)) + \text{sum}(ND01, F5_1(ND01, I1)) \\ + \text{sum}(ND02, F6_1(ND02, I1)) + \text{sum}(ND03, F7_1(ND03, I1)) + \text{sum}(K1, F8_1(K1, I1)) + \text{sum}(NW, F14_2(NW, I1)) \\ + \text{sum}(MW, F15_2(MW, I1)) =L= \text{DDA1}(I1) + 0.5;$$

1129 *Flujos al sumidero
1131
$$\text{WLFN}(K0) \dots \text{sum}(K3, F16_1(K0, K3)) =E= (\text{sum}(K5, F2_1(K5, K0)) + \text{sum}(J1, F13_1(J1, K0)) \\ + \text{sum}(I2, F13_2(I2, K0))) * \text{WLK0}(K0);$$


```

1129 WLEP1(J01) .. sum(K3,F16_2(J01,K3)) =E= sum(K0,F0_2(K0,J01))*WLJ01(J01);
WLEP2(J02) .. sum(K3,F16_3(J02,K3)) =E= sum(K4,F1_1(K4,J02))*WLJ02(J02);
1131 WLN1P1(ND01) .. sum(K3,F16_4(ND01,K3)) =E= sum(K0,F0_3(K0,ND01))*WLND01(ND01);
WLN1P2(ND02) .. sum(K3,F16_5(ND02,K3)) =E= sum(K4,F1_2(K4,ND02))*WLND02(ND02);
1133 WLN1P3(ND03) .. sum(K3,F16_6(ND03,K3)) =E= sum(K5,F2_2(K5,ND03))*WLND03(ND03);
WLDIS(K1) .. sum(K3,F16_7(K1,K3)) =E= (sum(J01,F3_4(J01,K1))+sum(J02,F4_4(J02,
K1))+sum(ND01,F5_4(ND01,K1))+sum(ND02,F6_4(ND02,K1))+sum(ND03,F7_4(ND03,K1)
))+sum(NW,F14_1(NW,K1))+sum(MW,F15_1(MW,K1)))*WLK1(K1);
WLCI(I1) .. sum(K3,F16_8(I1,K3)) =E= (sum(J01,F3_1(J01,I1))+sum(J02,F4_1(J02,I1
))+sum(ND01,F5_1(ND01,I1))+sum(ND02,F6_1(ND02,I1))+sum(ND03,F7_1(ND03,I1))+
sum(K1,F8_1(K1,I1))+sum(NW,F14_2(NW,I1))+sum(MW,F15_2(MW,I1)))*WLI1(I1);
1135 WLCD(I0) .. sum(K3,F16_9(I0,K3)) =E= (sum(J01,F3_2(J01,I0))+sum(J02,F4_2(J02,I0
))+sum(ND01,F5_2(ND01,I0))+sum(ND02,F6_2(ND02,I0))+sum(ND03,F7_2(ND03,I0))+
sum(K1,F8_2(K1,I0))+sum(NW,F14_4(NW,I0))+sum(MW,F15_4(MW,I0)))*WLI0(I0);
WLCA(I2) .. sum(K3,F16_10(I2,K3)) =E= (sum(J01,F3_3(J01,I2))+sum(J02,F4_3(J02,
I2))+sum(ND01,F5_3(ND01,I2))+sum(ND02,F6_3(ND02,I2))+sum(ND03,F7_3(ND03,I2)
))+sum(K1,F8_3(K1,I2))+sum(K0,F0_1(K0,I2))+sum(NW,F14_3(NW,I2))+sum(MW,F15_3
(MW,I2)))*WLI2(I2);
1137 WPRECC(K2) .. sum(K3,F16_11(K2,K3)) =E= (sum(I1,F9_1(I1,K2))+sum(I0,F9_2(I0,
K2)))*WLK2(K2);
WLEW(J1) .. sum(K3,F16_12(J1,K3)) =E= (sum(K2,F10_3(K2,J1))+sum(I1,F10_1(I1,J1)
))+sum(I0,F10_2(I0,J1))*WLJ1(J1);
1139 WLNW1(NW) .. sum(K3,F16_13(NW,K3)) =E= (sum(K2,F11_3(K2,NW))+sum(I1,F11_1(I1,NW
))+sum(I0,F11_2(I0,NW)))*WLNW(NW);
WLMW1(MW) .. sum(K3,F16_14(MW,K3)) =E= (sum(K2,F12_3(K2,MW))+sum(I1,F12_1(I1,MW
))+sum(I0,F12_2(I0,MW)))*WLMW(MW);
1141
*Capacidad maxima de plantas de tratamiento
1143 DIM1J01(J01) .. sum(K0,F0_2(K0,J01)) =L= AFJ01(J01)*1.23*E_EP1(J01);
DIM2J01(J01) .. sum(K0,F0_2(K0,J01)) =G= AFJ01(J01)*0.75*0.85*E_EP1(J01);
1145 DIM1J02(J02) .. sum(K4,F1_1(K4,J02)) =L= AFJ02(J02)*1.32*E_EP2(J02);
DIM2J02(J02) .. sum(K4,F1_1(K4,J02)) =G= AFJ02(J02)*0.75*0.85*E_EP2(J02);
1147 DIM1EW(J1) .. (sum(K2,F10_3(K2,J1))+sum(I1,F10_1(I1,J1))+sum(I0,F10_2(I0,J1)))
=L= AFJ1(J1)*1.23*E_EW(J1);
DIM2EW(J1) .. (sum(K2,F10_3(K2,J1))+sum(I1,F10_1(I1,J1))+sum(I0,F10_2(I0,J1)))
=G= AFJ1(J1)*0.75*0.85*E_EW(J1);
1149 DIM1MW(MW) .. (sum(K2,F12_3(K2,MW))+sum(I1,F12_1(I1,MW))+sum(I0,F12_2(I0,MW)))
=L= AFMW(MW)*1.23*E_MW(MW);
DIM2MW(MW) .. (sum(K2,F12_3(K2,MW))+sum(I1,F12_1(I1,MW))+sum(I0,F12_2(I0,MW)))
=G= AFMW(MW)*0.75*0.85*E_MW(MW);
1151
*Restricciones logicas de existencia
1153 EN1NP1(ND01) .. sum(K0,F0_3(K0,ND01)) =L= M*E_NP1(ND01);
EN2NP1(ND01) .. sum(K0,F0_3(K0,ND01))*M =G= E_NP1(ND01);
1155 EN1NP2(ND02) .. sum(K4,F1_2(K4,ND02)) =L= M*E_NP2(ND02);
EN2NP2(ND02) .. sum(K4,F1_2(K4,ND02))*M =G= E_NP2(ND02);
1157 EN1NP3(ND03) .. sum(K5,F2_2(K5,ND03)) =L= M*E_NP3(ND03);
EN2NP3(ND03) .. sum(K5,F2_2(K5,ND03))*M =G= E_NP3(ND03);
1159 EN1NW(NW) .. sum(K2,F11_3(K2,NW))+sum(I1,F11_1(I1,NW))+sum(I0,F11_2(I0,NW)) =L
=M*E_NW(NW);
EN2NW(NW) .. (sum(K2,F11_3(K2,NW))+sum(I1,F11_1(I1,NW))+sum(I0,F11_2(I0,NW)))*
M =G= E_NW(NW);
1161 UBI(MW,J1) .. E_EW(J1)+E_MW(MW) =L= 1;
1163
*Maximo de precipitaciones

```

```

1165 *MAXR_RCP4.. sum(K5,F2_1(K5, 'RCP4')) =L= 0.0007599670176;
1166 *MAXR_RCP3.. sum(K5,F2_1(K5, 'RCP3')) =L= 0.0001504427249;
1167 MAXR_RCP2.. sum(K5,F2_1(K5, 'RCP2')) =E= 0;
1168 MAXR_RCP1.. sum(K5,F2_1(K5, 'RCP1')) =E= 0;
1169 *MAXR_RH3.. sum(K5,F2_1(K5, 'RH3')) =L= 0.0009028922999;
1170 *MAXR_RH2.. sum(K5,F2_1(K5, 'RH2')) =L= 0.00026286788020;
1171 *MAXR_RH1.. sum(K5,F2_1(K5, 'RH1')) =L= 0.0006127005899;
1172 MAXR_SUB.. sum(K5,F2_1(K5, 'SUB')) =E= 0;
1173
1174 *Conexiones entre rios y fuentes ficticias de lluvia , por geografia
1175 **
1176
1177 CONRCP4_1.. F2_1( 'LLCP4', 'RCP4') =E= 0.0007599670176 -lm;
1178 CONRCP4_2.. F2_1( 'LLCP3', 'RCP4') =E= 0;
1179 CONRCP4_3.. F2_1( 'LLH1', 'RCP4') =E= 0;
1180 CONRCP4_4.. F2_1( 'LLH2', 'RCP4') =E= 0;
1181 CONRCP4_5.. F2_1( 'LLH3', 'RCP4') =E= 0;
1182 CONRCP4_6.. F2_1( 'DMK', 'RCP4') =E= 0;
1183 CONRCP4_7.. F2_1( 'CNY', 'RCP4') =E= 0;
1184 CONRCP4_8.. F2_1( 'CNYALB', 'RCP4') =E= 0;
1185 CONRCP4_9.. F2_1( 'PAR', 'RCP4') =E= 0;
1186 CONRCP4_10.. F2_1( 'CNYLZ', 'RCP4') =E= 0;
1187 CONRCP4_11.. F2_1( 'MANFL', 'RCP4') =E= 0;
1188 CONRCP4_12.. F2_1( 'JDLG', 'RCP4') =E= 0;
1189
1190
1191 CONRCP3_1.. F2_1( 'LLCP4', 'RCP3') =E= 0;
1192 CONRCP3_2.. F2_1( 'LLCP3', 'RCP3') =E= 0.0001504427249 -lm;
1193 CONRCP3_3.. F2_1( 'LLH1', 'RCP3') =E= 0;
1194 CONRCP3_4.. F2_1( 'LLH2', 'RCP3') =E= 0;
1195 CONRCP3_5.. F2_1( 'LLH3', 'RCP3') =E= 0;
1196 CONRCP3_6.. F2_1( 'DMK', 'RCP3') =E= 0;
1197 CONRCP3_7.. F2_1( 'CNY', 'RCP3') =E= 0;
1198 CONRCP3_8.. F2_1( 'CNYALB', 'RCP3') =E= 0;
1199 CONRCP3_9.. F2_1( 'PAR', 'RCP3') =E= 0;
1200 CONRCP3_10.. F2_1( 'CNYLZ', 'RCP3') =E= 0;
1201 CONRCP3_11.. F2_1( 'MANFL', 'RCP3') =E= 0;
1202 CONRCP3_12.. F2_1( 'JDLG', 'RCP3') =E= 0;
1203
1204
1205 CONRH3_1.. F2_1( 'LLCP4', 'RH3') =E= 0;
1206 CONRH3_2.. F2_1( 'LLCP3', 'RH3') =E= 0;
1207 CONRH3_3.. F2_1( 'LLH1', 'RH3') =E= 0;
1208 CONRH3_4.. F2_1( 'LLH2', 'RH3') =E= 0;
1209 CONRH3_5.. F2_1( 'LLH3', 'RH3') =E= 0.0009028922999 -lm;
1210 CONRH3_6.. F2_1( 'DMK', 'RH3') =E= 0;
1211 CONRH3_7.. F2_1( 'CNY', 'RH3') =E= 0;
1212 CONRH3_8.. F2_1( 'CNYALB', 'RH3') =E= 0;
1213 CONRH3_9.. F2_1( 'PAR', 'RH3') =E= 0;
1214 CONRH3_10.. F2_1( 'CNYLZ', 'RH3') =E= 0;
1215 CONRH3_11.. F2_1( 'MANFL', 'RH3') =E= 0;
1216 CONRH3_12.. F2_1( 'JDLG', 'RH3') =E= 0;
1217
1218
1219 CONRH2_1.. F2_1( 'LLCP4', 'RH2') =E= 0;
1220 CONRH2_2.. F2_1( 'LLCP3', 'RH2') =E= 0;

```

```

1221 CONRH2_3.. F2_1( 'LLH1' , 'RH2' ) =E= 0;
CONRH2_4.. F2_1( 'LLH2' , 'RH2' ) =E= 0.00026286788020 -lm;
1223 CONRH2_5.. F2_1( 'LLH3' , 'RH2' ) =E= 0;
CONRH2_6.. F2_1( 'DMK' , 'RH2' ) =E= 0;
1225 CONRH2_7.. F2_1( 'CNY' , 'RH2' ) =E= 0;
CONRH2_8.. F2_1( 'CNYALB' , 'RH2' ) =E= 0;
1227 CONRH2_9.. F2_1( 'PAR' , 'RH2' ) =E= 0;
CONRH2_10.. F2_1( 'CNYLZ' , 'RH2' ) =E= 0;
1229 CONRH2_11.. F2_1( 'MANFL' , 'RH2' ) =E= 0;
CONRH2_12.. F2_1( 'JDLG' , 'RH2' ) =E= 0;
1231
1233 CONRH1_1.. F2_1( 'LLCP4' , 'RH1' ) =E= 0;
CONRH1_2.. F2_1( 'LLCP3' , 'RH1' ) =E= 0;
1235 CONRH1_3.. F2_1( 'LLH1' , 'RH1' ) =E= 0.0006127005899 -lm;
CONRH1_4.. F2_1( 'LLH2' , 'RH1' ) =E= 0;
1237 CONRH1_5.. F2_1( 'LLH3' , 'RH1' ) =E= 0;
CONRH1_6.. F2_1( 'DMK' , 'RH1' ) =E= 0;
1239 CONRH1_7.. F2_1( 'CNY' , 'RH1' ) =E= 0;
CONRH1_8.. F2_1( 'CNYALB' , 'RH1' ) =E= 0;
1241 CONRH1_9.. F2_1( 'PAR' , 'RH1' ) =E= 0;
CONRH1_10.. F2_1( 'CNYLZ' , 'RH1' ) =E= 0;
1243 CONRH1_11.. F2_1( 'MANFL' , 'RH1' ) =E= 0;
CONRH1_12.. F2_1( 'JDLG' , 'RH1' ) =E= 0;
1245
RESCON.. lm =L= 0.001;
1247
*Flujos maximos asociados a fuente ficticias de lluvia
1249
MAXLL_LLCP4.. sum(K0,F2_1( 'LLCP4' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'LLCP4' ,ND03)) =E=
0.0007599670176;
1251 MAXLL_LLCP3.. sum(K0,F2_1( 'LLCP3' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'LLCP3' ,ND03)) =E=
0.0001504427249;
MAXLL_LLH3.. sum(K0,F2_1( 'LLH3' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'LLH3' ,ND03)) =E=
0.0009028922999;
1253 MAXLL_LLH2.. sum(K0,F2_1( 'LLH2' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'LLH2' ,ND03)) =E=
0.00026286788020;
MAXLL_LLH1.. sum(K0,F2_1( 'LLH1' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'LLH1' ,ND03)) =E=
0.0006127005899;
1255 MAXLL_DMK.. sum(K0,F2_1( 'DMK' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'DMK' ,ND03)) =E=
0.001360839782;
MAXLL_CNY.. sum(K0,F2_1( 'CNY' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'CNY' ,ND03)) =E=
0.002472726119;
1257 MAXLL_CNYALB.. sum(K0,F2_1( 'CNYALB' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'CNYALB' ,ND03)) =E=
0.002123557021;
MAXLL_PAR.. sum(K0,F2_1( 'PAR' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'PAR' ,ND03)) =E=
0.002228529748;
1259 MAXLL_CNYLZ.. sum(K0,F2_1( 'CNYLZ' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'CNYLZ' ,ND03)) =E=
0.0050615248;
MAXLL_MANFL.. sum(K0,F2_1( 'MANFL' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'MANFL' ,ND03)) =E=
0.001716351643;
1261 MAXLL_JDLG.. sum(K0,F2_1( 'JDLG' ,K0))+sum(ND03,F2_2( 'JDLG' ,ND03)) =E=
0.001762653812;
MAXBSE.. sum(BSE,F13_3(BSE, 'SUB' )) =E= 0.0000005;
1263 Desc.. sum(J1,F13_1(J1, 'SUB' )) =E= 0;
Desc2.. sum(K5, F2_1(K5, 'SUB' )) =E=0;

```

```

1265 * Escenarios
1267 BARR1(K1) .. sum(NW,F14_1(NW,K1))+sum(MW,F15_1(MW,K1)) =L= BHum*(sum(J01,F3_4(
    J01,K1))+sum(J02,F4_4(J02,K1))+sum(ND01,F5_4(ND01,K1))+sum(ND02,F6_4(ND02,
    K1))+sum(ND03,F7_4(ND03,K1))+sum(NW,F14_1(NW,K1))+sum(MW,F15_1(MW,K1)));
    BARR2(I2) .. sum(NW,F14_3(NW,I2))+sum(MW,F15_3(MW,I2)) =L= BHum*(sum(J01,F3_3(
    J01,I2))+sum(J02,F4_3(J02,I2))+sum(ND01,F5_3(ND01,I2))+sum(ND02,F6_3(ND02,
    I2))+sum(ND03,F7_3(ND03,I2))+sum(K1,F8_3(K1,I2))+sum(K0,F0_1(K0,I2))+sum(NW
    ,F14_3(NW,I2))+sum(MW,F15_3(MW,I2)));
1269 BARR3(I0) .. sum(NW,F14_4(NW,I0))+sum(MW,F15_4(MW,I0)) =L= BHum*(sum(J01,F3_2(
    J01,I0))+sum(J02,F4_2(J02,I0))+sum(ND01,F5_2(ND01,I0))+sum(ND02,F6_2(ND02,
    I0))+sum(ND03,F7_2(ND03,I0))+sum(K1,F8_2(K1,I0))+sum(NW,F14_4(NW,I0))+sum(
    MW,F15_4(MW,I0)));
    BARR4(I1) .. sum(NW,F14_2(NW,I1))+sum(MW,F15_2(MW,I1)) =L= BHum*(sum(J01,F3_1(
    J01,I1))+sum(J02,F4_1(J02,I1))+sum(ND01,F5_1(ND01,I1))+sum(ND02,F6_1(ND02,
    I1))+sum(ND03,F7_1(ND03,I1))+sum(K1,F8_1(K1,I1))+sum(NW,F14_2(NW,I1))+sum(
    MW,F15_2(MW,I1)));
1271
1273 * Restricciones economicas
1275
1277 * OPERACIONALES
1279
1281 * Plantas de tratamiento
1283 OpC_J01(J01) .. PlantOpCJ01(J01) =E= ((4646261*sum(K0,F0_2(K0,J01)))+E_EP1(J01)
    *700594);
    OpC_ND01(ND01) .. PlantOpCND01(ND01) =E= ((4646261*sum(K0,F0_3(K0,ND01)))+E_NP1
    (ND01)*700594);
1285 OpC_ND03(ND03) .. PlantOpCND03(ND03) =E= ((39804*sum(K5,F2_2(K5,ND03)))+E_NP3(
    ND03)*701611);
1287 OpC_J02(J02) .. PlantOpCJ02(J02) =E= ((4646261*sum(K4,F1_1(K4,J02)))+E_EP2(J02)
    *700594);
    OpC_ND02(ND02) .. PlantOpCND02(ND02) =E= ((4646261*sum(K4,F1_2(K4,ND02)))+E_NP2
    (ND02)*700594);
1289 OpC_EW(J1) .. PlantOpCEW(J1) =E= ((59706*(sum(K2,F10_3(K2,J1))+sum(I1,F10_1(I1,
    J1))+sum(I0,F10_2(I0,J1))))+E_EW(J1)*702435);
1291 OpC_NW(NW) .. PlantOpCNW(NW) =E= ((5126850*(sum(K2,F11_3(K2,NW))+sum(I1,F11_1(
    I1,NW))+sum(I0,F11_2(I0,NW))))+E_NW(NW)*701316);
1293 OpC_MW(MW) .. PlantOpCMW(MW) =E= ((5126850*(sum(K2,F12_3(K2,MW))+sum(I1,F12_1(
    I1,MW))+sum(I0,F12_2(I0,MW))))+E_MW(MW)*701316);
1295
1297 * Red
1299 OpC1 .. RedOpC1 =E= sum(K0, sum(I2, ((F0_1(K0,I2)*g*DH1(K0,I2))+(DIST1(K0,I2)
    *((2.79*F0_1(K0,I2))))));
1301 OpC2 .. RedOpC2 =E= sum(K0, sum(J01, ((F0_2(K0,J01)*g*DH2(K0,J01))+(DIST2(K0,
    J01)*((2.79*F0_2(K0,J01))))));
1303 OpC3 .. RedOpC3 =E= sum(K0, sum(ND01, ((F0_3(K0,ND01)*g*DH3(K0,ND01))+(DIST3(K0
    ,ND01)*((2.79*F0_3(K0,ND01))))));
1305 OpC4 .. RedOpC4 =E= sum(K4, sum(J02, ((F1_1(K4,J02)*g*DH4(K4,J02))+(DIST4(K4,
    J02)*((2.79*F1_1(K4,J02))))));
1307 OpC5 .. RedOpC5 =E= sum(K4, sum(ND02, ((F1_2(K4,ND02)*g*DH5(K4,ND02))+(DIST5(K4

```

```

,ND02)*((2.79*F1_2(K4,ND02)))));
1299 OpC6.. RedOpC6 =E= sum(K5, sum(K0 ,((F2_1(K5,K0)*g*Dh6(K5,K0)))+(DIST6(K5,K0)
* ((2.79*F2_1(K5,K0))))));
OpC7.. RedOpC7 =E= sum(K5, sum(ND03 ,((F2_2(K5,ND03)*g*Dh7(K5,ND03)))+(DIST7(K5
,ND03)* ((2.79*F2_2(K5,ND03))))));
1301 OpC8.. RedOpC8 =E= sum(J01, sum(I1 ,((F3_1(J01,I1)*g*Dh8(J01,I1)))+(DIST8(J01,
I1)* ((2.79*F3_1(J01,I1))))));
1303 OpC9.. RedOpC9 =E= sum(J01, sum(I0 ,((F3_2(J01,I0)*g*Dh9(J01,I0)))+(DIST9(J01,
I0)* ((2.79*F3_2(J01,I0))))));
OpC10.. RedOpC10 =E= sum(J01, sum(I2 ,((F3_3(J01,I2)*g*Dh10(J01,I2)))+(DIST10(
J01,I2)* ((2.79*F3_3(J01,I2))))));
1305 OpC11.. RedOpC11 =E= sum(J01, sum(K1 ,((F3_4(J01,K1)*g*Dh11(J01,K1)))+(DIST11(
J01,K1)* ((2.79*F3_4(J01,K1))))));
1307 OpC12.. RedOpC12 =E= sum(J02, sum(I1 ,((F4_1(J02,I1)*g*Dh12(J02,I1)))+(DIST12(
J02,I1)* ((2.79*F4_1(J02,I1))))));
OpC13.. RedOpC13 =E= sum(J02, sum(I0 ,((F4_2(J02,I0)*g*Dh13(J02,I0)))+(DIST13(
J02,I0)* ((2.79*F4_2(J02,I0))))));
1309 OpC14.. RedOpC14 =E= sum(J02, sum(I2 ,((F4_3(J02,I2)*g*Dh14(J02,I2)))+(DIST14(
J02,I2)* ((2.79*F4_3(J02,I2))))));
OpC15.. RedOpC15 =E= sum(J02, sum(K1 ,((F4_4(J02,K1)*g*Dh15(J02,K1)))+(DIST15(
J02,K1)* ((2.79*F4_4(J02,K1))))));
1311 OpC16.. RedOpC16 =E= sum(ND01, sum(I1 ,((F5_1(ND01,I1)*g*Dh16(ND01,I1)))+(
DIST16(ND01,I1)* ((2.79*F5_1(ND01,I1))))));
1313 OpC17.. RedOpC17 =E= sum(ND01, sum(I0 ,((F5_2(ND01,I0)*g*Dh17(ND01,I0)))+(
DIST17(ND01,I0)* ((2.79*F5_2(ND01,I0))))));
OpC18.. RedOpC18 =E= sum(ND01, sum(I2 ,((F5_3(ND01,I2)*g*Dh18(ND01,I2)))+(
DIST18(ND01,I2)* ((2.79*F5_3(ND01,I2))))));
1315 OpC19.. RedOpC19 =E= sum(ND01, sum(K1 ,((F5_4(ND01,K1)*g*Dh19(ND01,K1)))+(
DIST19(ND01,K1)* ((2.79*F5_4(ND01,K1))))));
1317 OpC20.. RedOpC20 =E= sum(ND02, sum(I1 ,((F6_1(ND02,I1)*g*Dh20(ND02,I1)))+(
DIST20(ND02,I1)* ((2.79*F6_1(ND02,I1))))));
OpC21.. RedOpC21 =E= sum(ND02, sum(I0 ,((F6_2(ND02,I0)*g*Dh21(ND02,I0)))+(
DIST21(ND02,I0)* ((2.79*F6_2(ND02,I0))))));
1319 OpC22.. RedOpC22 =E= sum(ND02, sum(I2 ,((F6_3(ND02,I2)*g*Dh22(ND02,I2)))+(
DIST22(ND02,I2)* ((2.79*F6_3(ND02,I2))))));
OpC23.. RedOpC23 =E= sum(ND02, sum(K1 ,((F6_4(ND02,K1)*g*Dh23(ND02,K1)))+(
DIST23(ND02,K1)* ((2.79*F6_4(ND02,K1))))));
1321 OpC24.. RedOpC24 =E= sum(ND03, sum(I1 ,((F7_1(ND03,I1)*g*Dh24(ND03,I1)))+(
DIST24(ND03,I1)* ((2.79*F7_1(ND03,I1))))));
1323 OpC25.. RedOpC25 =E= sum(ND03, sum(I0 ,((F7_2(ND03,I0)*g*Dh25(ND03,I0)))+(
DIST25(ND03,I0)* ((2.79*F7_2(ND03,I0))))));
OpC26.. RedOpC26 =E= sum(ND03, sum(I2 ,((F7_3(ND03,I2)*g*Dh26(ND03,I2)))+(
DIST26(ND03,I2)* ((2.79*F7_3(ND03,I2))))));
1325 OpC27.. RedOpC27 =E= sum(ND03, sum(K1 ,((F7_4(ND03,K1)*g*Dh27(ND03,K1)))+(
DIST27(ND03,K1)* ((2.79*F7_4(ND03,K1))))));
1327 OpC28.. RedOpC28 =E= sum(K1, sum(I1 ,((F8_1(K1,I1)*g*Dh28(K1,I1)))+(DIST28(K1,
I1)* ((2.79*F8_1(K1,I1))))));
OpC29.. RedOpC29 =E= sum(K1, sum(I0 ,((F8_2(K1,I0)*g*Dh29(K1,I0)))+(DIST29(K1,
I0)* ((2.79*F8_2(K1,I0))))));

```

1329 OpC30.. RedOpC30 =E= sum(K1, sum(I2 ,((F8_3(K1, I2)*g*DH30(K1, I2)))+(DIST30(K1, I2)*((2.79*F8_3(K1, I2))))));

1331 OpC31.. RedOpC31 =E= sum(I1, sum(K2 ,((F9_1(I1, K2)*g*DH31(I1, K2)))+(DIST31(I1, K2)*((2.79*F9_1(I1, K2))))));

OpC32.. RedOpC32 =E= sum(I0, sum(K2 ,((F9_2(I0, K2)*g*DH32(I0, K2)))+(DIST32(I0, K2)*((2.79*F9_2(I0, K2))))));

1333 OpC33.. RedOpC33 =E= sum(J1, sum(I1 ,((F10_1(I1, J1)*g*DH33(I1, J1)))+(DIST33(I1, J1)*((2.79*F10_1(I1, J1))))));

1335 OpC34.. RedOpC34 =E= sum(J1, sum(I0 ,((F10_2(I0, J1)*g*DH34(I0, J1)))+(DIST34(I0, J1)*((2.79*F10_2(I0, J1))))));

OpC35.. RedOpC35 =E= sum(J1, sum(K2 ,((F10_3(K2, J1)*g*DH35(K2, J1)))+(DIST35(K2, J1)*((2.79*F10_3(K2, J1))))));

1337 OpC36.. RedOpC36 =E= sum(NW, sum(I1 ,((F11_1(I1, NW)*g*DH36(I1, NW)))+(DIST36(I1, NW)*((2.79*F11_1(I1, NW))))));

1339 OpC37.. RedOpC37 =E= sum(NW, sum(I0 ,((F11_2(I0, NW)*g*DH37(I0, NW)))+(DIST37(I0, NW)*((2.79*F11_2(I0, NW))))));

OpC38.. RedOpC38 =E= sum(NW, sum(K2 ,((F11_3(K2, NW)*g*DH38(K2, NW)))+(DIST38(K2, NW)*((2.79*F11_3(K2, NW))))));

1341 OpC39.. RedOpC39 =E= sum(MW, sum(I1 ,((F12_1(I1, MW)*g*DH39(I1, MW)))+(DIST39(I1, MW)*((2.79*F12_1(I1, MW))))));

1343 OpC40.. RedOpC40 =E= sum(MW, sum(I0 ,((F12_2(I0, MW)*g*DH40(I0, MW)))+(DIST40(I0, MW)*((2.79*F12_2(I0, MW))))));

OpC41.. RedOpC41 =E= sum(MW, sum(K2 ,((F12_3(K2, MW)*g*DH41(K2, MW)))+(DIST41(K2, MW)*((2.79*F12_3(K2, MW))))));

1345 OpC42.. RedOpC42 =E= sum(J1, sum(K0 ,((F13_1(J1, K0)*g*DH42(J1, K0)))+(DIST42(J1, K0)*((2.79*F13_1(J1, K0))))));

1347 OpC43.. RedOpC43 =E= sum(I2, sum(K0 ,((F13_2(I2, K0)*g*DH43(I2, K0)))+(DIST43(I2, K0)*((2.79*F13_2(I2, K0))))));

1349 OpC44.. RedOpC44 =E= sum(NW, sum(K1 ,((F14_1(NW, K1)*g*DH44(NW, K1)))+(DIST44(NW, K1)*((2.79*F14_1(NW, K1))))));

OpC45.. RedOpC45 =E= sum(NW, sum(I1 ,((F14_2(NW, I1)*g*DH45(NW, I1)))+(DIST45(NW, I1)*((2.79*F14_2(NW, I1))))));

1351 OpC46.. RedOpC46 =E= sum(NW, sum(I2 ,((F14_3(NW, I2)*g*DH46(NW, I2)))+(DIST46(NW, I2)*((2.79*F14_3(NW, I2))))));

OpC47.. RedOpC47 =E= sum(NW, sum(I0 ,((F14_4(NW, I0)*g*DH47(NW, I0)))+(DIST47(NW, I0)*((2.79*F14_4(NW, I0))))));

1353 OpC48.. RedOpC48 =E= sum(MW, sum(K1 ,((F15_1(MW, K1)*g*DH48(MW, K1)))+(DIST48(MW, K1)*((2.79*F15_1(MW, K1))))));

1355 OpC49.. RedOpC49 =E= sum(MW, sum(I1 ,((F15_2(MW, I1)*g*DH49(MW, I1)))+(DIST49(MW, I1)*((2.79*F15_2(MW, I1))))));

OpC50.. RedOpC50 =E= sum(MW, sum(I2 ,((F15_3(MW, I2)*g*DH50(MW, I2)))+(DIST50(MW, I2)*((2.79*F15_3(MW, I2))))));

1357 OpC51.. RedOpC51 =E= sum(MW, sum(I0 ,((F15_4(MW, I0)*g*DH51(MW, I0)))+(DIST51(MW, I0)*((2.79*F15_4(MW, I0))))));

1359 *INSTALACIoN DE PLANTAS Y CA[+FFFD]RAS

1361 *Plantas de tratamiento

```

1363 CapC_ND01(ND01) .. PlantCapCND01(ND01) =E= 3250000*sum(K0,F0_3(K0,ND01))+E_NP1(
      ND01) *(650000);
1365 CapC_ND02(ND02) .. PlantCapCND02(ND02) =E= 3250000*sum(K4,F1_2(K4,ND02))+ E_NP2
      (ND02) *(650000);
      CapC_ND03(ND03) .. PlantCapCND03(ND03) =E= 17100*sum(K5,F2_2(K5,ND03))+E_NP3(
      ND03) *(57500+TerrND03(ND03));
1367 CapC_NW(NW) .. PlantCapCNW(NW) =E= 5190000*(sum(K2,F11_3(K2,NW))+sum(I1 ,F11_1(
      I1 ,NW))+sum(I0 ,F11_2(I0 ,NW)))+E_NW(NW) *(3290000+TerrNW(NW));
      CapC_MW(MW) .. PlantCapCMW(MW) =E= 2880000*(sum(K2,F12_3(K2,MW))+sum(I1 ,F12_1(
      I1 ,MW))+sum(I0 ,F12_2(I0 ,MW)))+E_MW(MW) *3150000;
1369 *Red
1371 CapC3 .. RedCapC3 =E= sum(K0, sum(ND01, (9.13 * DIST3(K0,ND01) * E_NP1(ND01) ) ) ) );
      CapC5 .. RedCapC5 =E= sum(K4, sum(ND02, (9.13 * DIST5(K4,ND02) * E_NP2(ND02) ) ) ) );
1373 CapC7 .. RedCapC7 =E= sum(K5, sum(ND03, (9.13 * DIST7(K5,ND03) * E_NP3(ND03) ) ) ) );
1375 CapCNP1_1 .. RedCapCNP1_CP =E= (9.13 * DIST19( 'NP1_CP' , 'PEAP30355' ) * E_NP1( 'NP1_CP
      ' ) ) );
      CapCNP1_2 .. RedCapCNP1_H =E= (9.13 * DIST19( 'NP1_H' , 'PEAP30302' ) * E_NP1( 'NP1_H' ) )
      ;
1377 CapCNP2_1 .. RedCapCNP2_CH =E= (9.13 * DIST23( 'NP2_CH' , 'D_CH' ) * E_NP2( 'NP2_CH' ) ) );
1379 CapCNP2_2 .. RedCapCNP2_CP =E= (9.13 * DIST23( 'NP2_CP' , 'PEAP30372' ) * E_NP2( 'NP2_CP
      ' ) ) );
      CapCNP2_3 .. RedCapCNP2_H =E= (9.13 * DIST23( 'NP2_H' , 'D_H' ) * E_NP2( 'NP2_H' ) ) );
1381 CapCNP3_1 .. RedCapCNP3_CH =E= (9.13 * DIST27( 'NP3_CH' , 'D_CH' ) * E_NP3( 'NP3_CH' ) ) );
1383 CapCNP3_2 .. RedCapCNP3_CP =E= (9.13 * DIST27( 'NP3_CP' , 'PEAP30355' ) * E_NP3( 'NP3_CP
      ' ) ) );
      CapCNP3_3 .. RedCapCNP3_H =E= (9.13 * DIST27( 'NP3_H' , 'PEAP30302' ) * E_NP3( 'NP3_H' ) )
      ;
1385 CapCNW_11 .. RedCapCNW_CH1 =E= (9.13 * DIST38( 'PEAS35116' , 'NW_CH' ) * E_NW( 'NW_CH' ) )
      ;
1387 CapCNW_12 .. RedCapCNW_CP1 =E= (9.13 * DIST38( 'PEAS35112' , 'NW_CP' ) * E_NW( 'NW_CP' ) )
      ;
      CapCNW_13 .. RedCapCNW_H1 =E= (9.13 * DIST38( 'R_H' , 'NW_H' ) * E_NW( 'NW_H' ) ) );
1389 CapCNW_21 .. RedCapCNW_CH2 =E= (9.13 * DIST44( 'NW_CH' , 'D_CH' ) * E_NW( 'NW_CH' ) ) );
1391 CapCNW_22 .. RedCapCNW_CP2 =E= (9.13 * DIST44( 'NW_CP' , 'PEAP30372' ) * E_NW( 'NW_CP' ) )
      ;
      CapCNW_23 .. RedCapCNW_H2 =E= (9.13 * DIST44( 'NW_H' , 'PEAP30302' ) * E_NW( 'NW_H' ) ) );
1393 CapCMW_1 .. RedCapCMW_ACDA =E= (9.13 * DIST48( 'MW_ACDA' , 'D_CH' ) * E_MW( 'MW_ACDA' ) ) );
1395 CapCMW_2 .. RedCapCMW_ACES =E= (9.13 * DIST48( 'MW_ACES' , 'D_CH' ) * E_MW( 'MW_ACES' ) ) );
      CapCMW_3 .. RedCapCMW_ACC =E= (9.13 * DIST48( 'MW_ACC' , 'PEAP30372' ) * E_MW( 'MW_ACC' )
      ) );
1397 CapCMW_4 .. RedCapCMW_ACCO =E= (9.13 * DIST48( 'MW_ACCO' , 'PEAP30111' ) * E_MW( '
      MW_ACCO' ) ) );
      CapCMW_5 .. RedCapCMW_ACTA =E= (9.13 * DIST48( 'MW_ACTA' , 'PEAP30110' ) * E_MW( '
      MW_ACTA' ) ) );
1399 CapCMW_6 .. RedCapCMW_ACV =E= (9.13 * DIST48( 'MW_ACV' , 'PEAP30367' ) * E_MW( 'MW_ACV' ) )
      ;
      CapCMW_7 .. RedCapCMW_ACF =E= (9.13 * DIST48( 'MW_ACF' , 'D_H' ) * E_MW( 'MW_ACF' ) ) );
1401

```

```

PARTIALCOST1.. PC1 =E= RedOpC1+RedOpC2+RedOpC3+RedOpC4+RedOpC5+RedOpC6+RedOpC7
+RedOpC8+RedOpC9+RedOpC10+RedOpC11+RedOpC12+RedOpC13+RedOpC14+RedOpC15+
RedOpC16+RedOpC17+RedOpC18+RedOpC19+RedOpC20;
1403 PARTIALCOST2.. PC2 =E= RedOpC21+RedOpC22+RedOpC23+RedOpC24+RedOpC25+RedOpC26+
RedOpC27+RedOpC28+RedOpC29+RedOpC30+RedOpC31+RedOpC32+RedOpC33+RedOpC34+
RedOpC35+RedOpC36+RedOpC37+RedOpC38+RedOpC39+RedOpC40;
PARTIALCOST3.. PC3 =E= RedOpC41+RedOpC42+RedOpC43+RedOpC44+RedOpC45+RedOpC46+
RedOpC47+RedOpC48+RedOpC49+RedOpC50+RedOpC51;
1405 RedOpCtotal.. RedOpC =E=T*E*(PC1+PC2+PC3);
1407 PlantOpCtotal.. PlantOpC =E= sum(J01, PlantOpCJ01(J01))+sum(ND01, PlantOpCND01(
ND01))+sum(ND03, PlantOpCND03(ND03))+sum(J02, PlantOpCJ02(J02))+sum(ND02,
PlantOpCND02(ND02))+sum(J1, PlantOpCEW(J1))+sum(NW, PlantOpCNW(NW))+sum(MW,
PlantOpCMW(MW));
PlantCapCtotal.. PlantCapC =E= sum(ND01, PlantCapCND01(ND01))+sum(ND02,
PlantCapCND02(ND02))+sum(ND03, PlantCapCND03(ND03))+sum(NW, PlantCapCNW(NW))+
sum(MW, PlantCapCMW(MW));
1409 RedCapCtotal.. RedCapCt =E= RedCapC3+RedCapC5+RedCapC7+RedCapCMW_ACDA+
RedCapCMW_ACES+RedCapCMW_ACC+RedCapCMW_ACCO+RedCapCMW_ACTA+RedCapCMW_ACV+
RedCapCMW_ACF+RedCapCNW_CH1+RedCapCNW_CP1+RedCapCNW_H1+RedCapCNW_CH2+
RedCapCNW_CP2+RedCapCNW_H2+RedCapCNP1_CP+RedCapCNP1_H+RedCapCNP2_CH+
RedCapCNP2_CP+RedCapCNP2_H+RedCapCNP3_CH+RedCapCNP3_CP+RedCapCNP3_H;

1411 TotalCost.. TC =E= RedOpC+PlantOpC+PlantCapC+RedCapCt;
EQWC1.. WC1 =E= HuRCP1-(0.7*(0.0007599670176+0.0001504427249));
1413 EQWC2.. WC2 =E= HuRH1-(0.7*(0.0006127005899+0.00026286788020+0.0009028922999))
;
*EQWC2.. WC2 =E= HuRV/(0.7*0.8);
1415 EQAMB1.. (0.5*(WC1))+(0.5*(WC2)) =G= -0.0001;
EQAMB2.. (0.5*(WC1))+(0.5*(WC2)) =L= 0.0001;
1417 FOAMB.. AMB =E= (sum(K0, (sum(J01, F0_2(K0, J01))+sum(ND01, F0_3(K0, ND01))+sum(I2
, F0_1(K0, I2)))))+(sum(K4, (sum(J02, F1_1(K4, J02))+sum(ND02, F1_2(K4, ND02))))));

1419 FOb1.. FO1 =E=(AMB-12.565092)/(17.596235-12.565092);
FOb2.. FO2 =E=(TC-233828682.3)/(13240629731.77-233828682.3);
1421 MO1.. FO1*w1 =L= gamma;
MO2.. FO2*w2 =L= gamma;
1423
1425
MODEL ATACMONOWC / ALL / ;
1427 OPTION LIMROW = 0 ;
OPTION LIMCOL = 0 ;
1429 OPTION MIP = CPLEX;
OPTION RESLIM = 3000;
1431 OPTION OptCR = 1E-10;
SOLVE ATACMONOWC USING MIP MINIMIZING gamma;
1433
*execute_unload "multi0.gdx" TC.L AMB.L
1435 *execute 'gdxxrw.exe multi0.gdx o=multi0.xlsx var=TC.L rng=!A1:C3'
*execute 'gdxxrw.exe multi0.gdx o=multi0.xlsx var=AMB.L rng=!D1:F3'
1437
execute_unload "resmultiatac.gdx" F0_1.L F0_2.L F0_3.L F1_1.L F1_2.L F2_1.L
F2_2.L F3_1.L F3_2.L F3_3.L F3_4.L F4_1.L F4_2.L F4_3.L F4_4.L
1439 F5_1.L F5_2.L F5_3.L F5_4.L F6_1.L F6_2.L F6_3.L F6_4.L F7_1.L
F7_2.L F7_3.L F7_4.L F8_1.L F8_2.L F8_3.L

```



```

          F9_1.L F9_2.L F10_1.L F10_2.L F10_3.L F11_1.L F11_2.L F11_3.L
1441      F12_1.L F12_2.L F12_3.L F13_1.L F13_2.L F13_3.L
          F14_1.L F14_2.L F14_3.L F14_4.L F15_1.L F15_2.L F15_3.L F15_4.L
          F16_1.L F16_2.L F16_3.L F16_4.L F16_5.L F16_6.L F16_7.L F16_8.L
          F16_9.L F16_10.L F16_11.L F16_12.L F16_13.L F16_14.L
1443
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F0_1.L rng=
FlujosM0!A2:Q11'
1445 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F0_2.L rng=
FlujosM0!R2:X11'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F0_3.L rng=
FlujosM0!Y2:AC11'
1447
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F1_1.L rng=
FlujosM1!A2:C4'
1449 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F1_2.L rng=
FlujosM1!D2:H4'
1451 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F2_1.L rng=
FlujosM2!A2:K20'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F2_2.L rng=
FlujosM2!L2:R20'
1453
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F3_1.L rng=
FlujosM3!A2:L8'
1455 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F3_2.L rng=
FlujosM3!M2:AC8'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F3_3.L rng=
FlujosM3!AD2:AS8'
1457 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F3_4.L rng=
FlujosM3!AT2:CF8'
1459 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F4_1.L rng=
FlujosM4!A2:L5'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F4_2.L rng=
FlujosM4!M2:AC5'
1461 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F4_3.L rng=
FlujosM4!AD2:AS5'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F4_4.L rng=
FlujosM4!AT2:CF5'
1463
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F5_1.L rng=
FlujosM5!A2:L6'
1465 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F5_2.L rng=
FlujosM5!M2:AC6'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F5_3.L rng=
FlujosM5!AD2:AS6'
1467 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F5_4.L rng=
FlujosM5!AT2:CF6'
1469 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F6_1.L rng=
FlujosM6!A2:L6'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F6_2.L rng=
FlujosM6!M2:AC6'
1471 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F6_3.L rng=
FlujosM6!AD2:AS6'

```

```

execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F6_4.L rng=
FlujosM6!AT2:CF6'
1473
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F7_1.L rng=
FlujosM7!A2:L6'
1475 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F7_2.L rng=
FlujosM7!M2:AC6'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F7_3.L rng=
FlujosM7!AD2:AS6'
1477 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F7_4.L rng=
FlujosM7!AT2:CF6'

execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F8_1.L rng=
FlujosM8!A2:L38'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F8_2.L rng=
FlujosM8!M2:AC38'
1481 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F8_3.L rng=
FlujosM8!AD2:AX38'

execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F9_1.L rng=
FlujosM9!A2:Q12'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F9_2.L rng=
FlujosM9!R2:AR12'
1485

execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F10_1.L rng=
FlujosM10!A2:I12'
1487 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F10_2.L rng=
FlujosM10!J2:S17'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F10_3.L rng=
FlujosM10!T2:AB20'
1489

execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F11_1.L rng=
FlujosM11!A2:E12'
1491 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F11_2.L rng=
FlujosM11!F2:J17'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F11_3.L rng=
FlujosM11!K2:O20'
1493

execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F12_1.L rng=
FlujosM12!A2:I12'
1495 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F12_2.L rng=
FlujosM12!J2:S17'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F12_3.L rng=
FlujosM12!T2:AB20'
1497

execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F13_1.L rng=
FlujosM13!A2:J10'
1499 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F13_2.L rng=
FlujosM13!K2:U17'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F13_3.L rng=
FlujosM13!V2:AG7'
1501

execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F14_1.L rng=
FlujosM14!A2:AL6'
1503 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F14_2.L rng=
FlujosM14!AM2:AX6'

```

```

execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F14_3.L rng=
FlujosM14!AY2:BP6'
1505 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F14_4.L rng=
FlujosM14!BQ2:CI6'

1507 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F15_1.L rng=
FlujosM15!A2:AL10'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F15_2.L rng=
FlujosM15!AM2:AX10'
1509 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F15_3.L rng=
FlujosM15!AY2:BP6'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F15_4.L rng=
FlujosM15!BQ2:CI6'

1511 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_1.L rng=
FlujosM16!A2:C30'
1513 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_2.L rng=
FlujosM16!D2:F30'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_3.L rng=
FlujosM16!G2:I30'
1515 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_4.L rng=
FlujosM16!J2:L30'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_5.L rng=
FlujosM16!M2:O30'
1517 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_6.L rng=
FlujosM16!P2:R30'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_7.L rng=
FlujosM16!S2:U30'
1519 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_8.L rng=
FlujosM16!V2:X30'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_9.L rng=
FlujosM16!Y2:AA30'
1521 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_10.L rng=
FlujosM16!AB2:AD30'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_11.L rng=
FlujosM16!AE2:AG30'
1523 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_12.L rng=
FlujosM16!AH2:AJ30'
execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_13.L rng=
FlujosM16!AK2:AM30'
1525 execute 'gdxxrw.exe resmultiatac.gdx o=resmultiatac.xlsx var=F16_14.L rng=
FlujosM16!AN2:AP30'

```