



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

FORMULACION DE UN MODELO DE OPTMIZACION PARA
LA GESTION DE SEDIMENTOS EN LA ZONA ALTA DEL RÍO MAIPO

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVL

CAMILO ANTONIO GATICA NAVEA

PROFESOR GUIA:
JAMES McPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISION:
YARKO NIÑO CAMPOS
MARCELO OLIVARES ALVEAL

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2010

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: CAMILO ANTONIO GATICA NAVEA
FECHA: 28 / 01 / 2010
PROF. GUÍA: SR. JAMES MCPHEE T.

“FORMULACIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA GESTIÓN DE SEDIMENTOS EN LA ZONA ALTA DEL RÍO MAIPO”

El continuo aumento de la actividad económica tiene por consecuencia una creciente presión sobre los recursos naturales. La cuenca del río Maipo, cercana a la ciudad de Santiago, evidencia ya las consecuencias y conflictos ambientales típicos de tal situación. La actividad en el sector de infraestructura requiere del desarrollo de una industria del árido estable y de precios moderados. Las características de drenaje del río Maipo generan depósitos de áridos cercanos a la ciudad, los cuales han sido explotados durante décadas. La magnitud de las extracciones es tal que se han declarado conflictos entre diferentes usuarios del río Maipo.

El objetivo principal de este trabajo se alinea con el de una gestión integrada de cuencas moderna, considerando, de esta manera, el río como una unidad de gestión. Como primer paso en este desafío se formula y resuelve un problema de optimización que apunta a determinar el esquema de extracciones óptimo de un sistema hipotético, inspirado en el sistema Maipo. La resolución del problema planteado se consigue con el acoplamiento de un modelo de transporte de sedimentos y evolución morfológica y algoritmos genéticos.

Se ha realizado un reconocimiento, utilizando imágenes satelitales gratuitas, de las diferentes zonas productivas del río Maipo e infraestructura, definiendo en total 7 zonas de acuerdo con criterio de distanciamiento mínimo. De esa manera se ha desarrollado un modelo de simulación que comparte una geometría aproximada a la del sistema real, y un modelo de gestión que conserva la disposición de la infraestructura y la ubicación de las zonas productivas del sistema Maipo real.

La formulación matemática del problema de optimización plantea la maximización de la productividad de áridos del sistema, siendo ésta restringida mediante la imposición de un descenso máximo admisible de las cotas de fondo en cualquier punto del modelo. La función objetivo (productividad total) es lineal respecto de las variables de decisión (tasas de extracción), no así las variables de estado del problema (descensos de las cotas de fondo). Se ha incluido el monitoreo de los efectos producidos sobre infraestructura contabilizando el tiempo que pasan sometidos a un descenso mayor a un umbral predefinido.

Para la utilización de algoritmos genéticos ha sido necesaria la implementación de una técnica que permita simular escenarios arbitrarios de extracción. Además, dentro del algoritmo genético se ha implementado la ampliación de la ventana de búsqueda de acuerdo a la evolución observada de la función objetivo, activándose ésta en 5 oportunidades.

Se ha obtenido un esquema de extracciones que activa, en la zona más baja, la restricción de descenso máximo admisible, consiguiendo una productividad que se asocia a la degradación del lecho. Las altas tasas de las primeras zonas de extracción se asocian a un fuerte cambio de pendiente del sistema, en tanto las contracciones y ensanchamientos producen también zonas de depositación.

Se recomienda, para aumentar la representatividad, incluir la variabilidad longitudinal de los caudales, además de estudiar la reducción del costo computacional priorizando los eventos de arrastre de sedimentos.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y Natalia, por su paciencia esfuerzo y dedicación. A mis abuelos por su inspiración.

A los miembros de la comisión, en especial al profesor McPhee por su apoyo permanente.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN	2
1.2 OBJETIVO.....	3
1.3 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA DEL ÁRIDO EN CHILE	5
2.2 NORMATIVA EN LA GESTIÓN DE SEDIMENTOS	9
2.3 MODELACIÓN HIDRÁULICA Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	13
2.3.1 <i>Cálculo de ejes hidráulicos:</i>	13
2.3.2 <i>Transporte de sedimentos</i>	16
2.3.3 <i>Evolución del lecho:</i>	19
2.4 MORFOLOGÍA	20
2.4.1 <i>Erosión producto de incisión en el lecho</i>	22
2.4.1.1 Descripción de efectos hacia aguas arriba	23
2.4.1.2 Descripción de efectos hacia aguas abajo.....	23
2.5 EXTRACCIÓN DE SEDIMENTOS	23
2.6 OPTIMIZACIÓN- SIMULACIÓN.....	26
2.6.1 <i>Introducción</i>	26
2.6.2 <i>Algoritmos genéticos</i>	27
2.6.2.1 Pasos previos a la inicialización del algoritmo genético.....	30
2.6.2.2 Generación de una población inicial	30
2.6.2.3 Evaluación de una población:.....	31
2.6.2.4 Criterio de detención:	33
2.6.2.5 Selección de Cromosomas.....	34
Método rueda de ruleta:	34
Método "Ranking":	34
Método "Tournament":.....	34
Otros métodos de selección:	34
2.6.2.6 Aplicación de operadores genéticos:	35
Elitismo	35
Crossover.....	35
Mutación.....	36
Técnica MicroGA.....	37
2.6.2.7 Construcción de una nueva población:	37
3. OPTIMIZACION - SIMULACIÓN.....	38
3.1 ESQUEMA GENERAL DE COMUNICACIÓN	39
3.2 DATOS DE ENTRADA	40
3.3 ARCHIVOS DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN	42
4. CASO DE ESTUDIO, RÍO MAIPO	43

4.1	INTRODUCCIÓN	44
4.2	ZONA DE ESTUDIO.....	46
4.3	INFORMACIÓN HIDROLÓGICA	50
4.4	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA	55
4.4.1	<i>Curva granulométrica</i>	57
4.5	PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN	59
4.5.1	<i>Introducción</i>	59
4.5.2	<i>Formulación conceptual</i>	59
4.5.3	<i>Formulación matemática</i>	60
4.5.4	<i>Evaluación implementada</i>	62
5.	RESULTADOS	67
5.1	PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO EJECUTADO	68
5.2	TIEMPO DE EJECUCIÓN	68
5.3	EVOLUCIÓN DE OBJETIVOS.....	69
5.3.1	<i>Función aptitud</i>	69
5.3.2	<i>Funciones objetivo secundarias</i>	70
5.4	ESPACIO DE BÚSQUEDA	71
5.4.1	<i>Espacio factible</i>	72
5.5	ESQUEMA DE EXTRACCIONES ÓPTIMO.....	73
6.	CONCLUSIONES	76
6.1	GENERALES	77
6.2	DESEMPEÑO DEL ALGORITMO GENÉTICO	77
6.3	SOBRE LA SOLUCIÓN ENCONTRADA	78
	RECOMENDACIONES	79
	REFERENCIAS	81
	ANEXO A “INFORMACION DEL MODELO”	85
	GEOMETRÍA DEL MODELO	86
	CURVA GRANULOMÉTRICA	90
	ANEXO B “GENERACIONES EJECUTADAS”	91
	GENERACIONES EJECUTADAS.....	92
	ANEXO C “EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS”	96
	<i>Zona de extracción 1</i>	97
	<i>Zona de extracción 2</i>	98
	<i>Zona de extracción 3</i>	99
	<i>Zona de extracción 4</i>	100
	<i>Zona de extracción 5</i>	101
	<i>Zona de extracción 6</i>	102
	<i>Zona de extracción 7</i>	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Producción típica de áridos (Comisión Nacional de Áridos, 2001).....	6
Figura 2.2 Est. Producción anual de áridos en la RM (Comisión Nacional de Áridos, 2001).....	7
Figura 2.3 Solicitud de concesión municipal para extracción de áridos desde un cauce natural (MOP, DOH, 1998).....	10
Figura 2.4 Gasto volumétrico vs caudal y esfuerzo de corte v/s caudal (MPM).....	19
Figura 2.5 Correa Transportadora (Kondolf, 1994)	20
Figura 2.6 Pluma de Sedimentos en costas chilenas (“ <i>Earth Observatory</i> ”).....	21
Figura 2.7 Esquema de pique y erosión retrograda (Kondolf, 1993)	22
Figura 2.8 Extracción de sedimentos en el río Maipo, desde banco arenoso (“ <i>Google Earth</i> ”)	24
Figura 2.9 Extracción de sedimentos desde bancos ribereños (“ <i>Google Earth</i> ”)	25
Figura 2.10 Acumulación de rechazos en riberas del río Maipo (“ <i>Google Earth</i> ” & fotografía por el Autor)	26
Figura 2.11 Individuo, conceptos en algoritmos genéticos clásicos.	28
Figura 2.12 Diagrama de flujo de algoritmo genético.....	30
Figura 2.13 Función objetivo y penalización.	33
Figura 2.14 Influencia del elitismo con tasas de mutación relativamente altas (0.1) (superior con elitismo, inferior sin elitismo).	35
Figura 2.15 Influencia de la de mutación sobre la diversidad y convergencia (Prob. Mutación: nula, 0.001, 0.01, 0.1).	37
Figura 3.1 Esquema general de comunicaciones en el proceso Optimización - Simulación.	40
Figura 3.2 “UBIC.INP” ejemplo de ingreso de información a MOSSEM.....	41
Figura 4.1 Ubicación de la zona de estudio.....	44
Figura 4.2 Esquema división político administrativa del río Maipo.	46
Figura 4.3 Bocatomas mayores y puente las Vertientes.....	47
Figura 4.4 Primera zona de extracción de áridos y captación de caudales.....	47
Figura 4.5 Segunda zona de extracción y bocatoma privada.	48
Figura 4.6 Puente “Concha y Toro” y tercera zona de extracción.	48
Figura 4.7 Bocatoma doble y cuarta zona de extracción.....	49
Figura 4.8 Puentes los morros y acceso sur y quinta zona de extracción.....	49
Figura 4.9 Sexta zona de extracción y puentes de tren y Ruta 5 Sur.	50
Figura 4.10 Séptima zona de extracción aguas abajo del puente Maipo.....	50
Figura 4.11 Curvas de variación estacional, Maipo en el Manzano y Maipo en Cabimbao	51

Figura 4.12 Bocatoma San Carlos e Independiente (estiaje y crecida de verano).....	52
Figura 4.13 Serie de caudales horarios seleccionada	53
Figura 4.14 Variación horaria de caudales, extracto de la serie de caudales horarios seleccionada	54
Figura 4.15 Análisis de frecuencia, caudales máximos instantáneos, Maipo en el Manzano	54
Figura 4.16 Zona de estudio, ubicación de perfiles generadores.	55
Figura 4.17 Perfil longitudinal y ancho basal del modelo de simulación.	56
Figura 4.18 Perfil Longitudinal e información del catastro.	57
Figura 4.19 Curva granulométrica y su modificación.	58
Figura 4.21 Esquema de extracciones e infraestructura existente en el Río Maipo	60
Figura 5.1 Tiempo de ejecución del algoritmo genético, detalle de las generaciones.	68
Figura 5.2 Evolución de la función aptitud o “ <i>fitness</i> ”.	69
Figura 5.3 Evolución de la cantidad de individuos factibles por generación.	70
Figura 5.4 Dispersión de objetivos, objetivo principal v/s objetivos secundarios.	70
Figura 5.5 Proyección de casos simulados en el plano x1, x2.	71
Figura 5.6 Casos ejecutados: Aptitud y extracción total v/s tasas de extracción local (Z. Extracción 4). ...	72
Figura 5.7 Situación inicial y final del lecho (Con extracciones y Sin Extracciones).	74
Figura 5.8 Cambio en las cotas de fondo del lecho (Con extracciones y Sin Extracciones).....	74
Figura C.0.1 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 1.....	97
Figura B.0.2 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 1” v/s generación.	97
Figura C.0.3 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 2.....	98
Figura C.4 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 2” v/s generación.	98
Figura B.0.5 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 3.....	99
Figura B.0.6 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 3” v/s generación.	99
Figura B.0.7 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 4.....	100
Figura B.0.8 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 4” v/s generación.	100
Figura B.0.9 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 5.....	101
Figura B.0.10 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 5” v/s generación.	101
Figura B.0.11 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 6.....	102
Figura B.0.12 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 6” v/s generación.	102
Figura B.0.13 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 7.....	103
Figura B.0.14 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 7” v/s generación.	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Solicitud de derecho de explotación de áridos desde un cauce natural (MOP, DOH 1998).....	10
Tabla 2.2 Estudios complementarios (MOP, DOH, 1998).....	12
Tabla 2.3 Definición de conceptos en algoritmos genéticos	29
Tabla 3.1 "UBIC.INP" columnas de datos ingresados.	41
Tabla 3.2 Salidas en caso exitoso.....	42
Tabla 4.1 Estación Maipo en el Manzano, datos de la estación.	53
Tabla 4.2 Información de entrada para el Caso de aplicación ("Ubic.inp").....	66
Tabla 5.1 Parámetros generales del algoritmo genético ejecutado.....	68
Tabla 5.2 Esquema de producción óptimo encontrado.	73
Tabla 6.1 Factibilidad de los casos enviados a simular.....	78

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Una cuenca, con su drenaje expresado en un río y su cauce, han sido un lugar de encuentro inmemorial, desde una mirada actual se dirá que “muchos son los sectores de la sociedad que usufructúan de los servicios ecosistémicos que genera y presta una cuenca”. Los recursos hídricos, los sedimentos, los sectores de recreación y contemplación, el control de inundaciones, la reserva de agua dulce, la dilución de contaminantes, el transporte de bienes, son parte de estos servicios, los cuales han sido explotados sin mayor preocupación durante el desarrollo de la humanidad. Recientemente se ha acrecentado la utilización de estos servicios llegando a evidenciarse efectos de interferencias, sinergia y situaciones de equilibrio en la utilización de los recursos de una cueca (swallow et al. 2009).

En la zona central de Chile, la presión sobre los recursos y servicios ecosistémicos de la cuenca del Maipo aumentarán en mayor medida y diversidad al compararlos con otras cuencas. Esta presión se debe a la creciente demanda por sus bienes y servicios, además del inminente cierre de pozos lastreiros ubicado al interior de la zona urbana (Comisión Nacional de Áridos, 2001). El sector de la construcción lidera la demanda por materiales áridos y está se alimenta de manera muy importante desde bancos de ríos.

La compleja dinámica responsable de la morfología del río Maipo y tantos otros cauces de la zona central de Chile es la que hace posible una actividad industrial casi invisible al ojo de la ciudadanía. La industria del árido es, sin duda, esencial para permitir el crecimiento económico del país, y por lo tanto, esencial, para el desarrollo de Chile (Comisión Nacional de Áridos, 2001). Es de suma importancia indagar en la dinámica del río y estimar de manera confiable los límites de su explotación, para así tomar decisiones acertadas sobre el emplazamiento de futura infraestructura y zonas de explotación así como la magnitud de las extracciones. El contar con una herramienta de modelación eficaz y confiable permitirá evitar daños futuros a infraestructura y planificar de acuerdo a los compromisos contraídos por el Estado (CONAMA, 2006).

Debe existir una forma objetiva de tomar una decisión informada sobre estas materias. Se deben sincerar las interferencias entre los usos del río y de la cuenca en general, al mismo tiempo que se deben aceptar ciertos principios básicos de convivencia. Los sistemas de los cuales dependemos están comunicados de manera compleja entre sí; los recursos son escasos; los de aguas abajo afectan también a los de aguas arriba, toda intervención tiene efectos, independiente de su magnitud o manifestación temporal. Actores institucionales y privados plantean la gestión integrada de cuencas como una necesidad y un bien social que debería implementarse tanto para lograr una administración ambientalmente sustentable, como con la capacidad de reducir y resolver conflictos respecto del uso de recursos hídricos (Diálogo Nacional Chile, 2003).

1.2 OBJETIVO

El objetivo general de este trabajo es: Elaborar una formulación matemática que permita la gestión óptima de las extracciones de áridos en la zona alta del río Maipo.

El término “óptimo” requiere de la existencia de un criterio o función objetivo. En este trabajo se enfocará los esfuerzos en realizar una formulación que permita por un lado la maximización de la productividad y por otro lado el monitoreo de la degradación en puntos de interés. La restricción que “amarra” el problema se relaciona con el máximo descenso admisible en el lecho del río Maipo.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

En el presente trabajo se ha logrado utilizar un modelo de simulación del transporte de sedimentos y evolución de la morfología 1D de la primera sección del río Maipo, para fines de gestión. Se ha logrado esto uniendo el modelo de simulación con un modelo de optimización estocástica para encontrar la gestión óptima de las zonas de extracción de áridos en la sección más intensamente explotada del río Maipo. Se ha identificado luego del proceso de optimización las zonas de producción más atractivas y las más sensibles, se ha logrado cuantificar el tiempo promedio de exposición de la infraestructura a impactos provocados por la explotación de áridos.

Para realizar lo anterior se ha implementado una herramienta que permite la evaluación de los efectos de un esquema de producción cualquiera, para así estudiar lo impactos de una situación de explotación arbitraria de áridos dentro del modelo.

Como caso de aplicación se ha tomado el río Maipo entre la localidad de El Manzano y el cruce del río Maipo con puente ruta 5. Sus condiciones geométricas son típicas de los ríos del Chile Central.

Utilizando el modelo modificado del río Maipo se pretende determinar la productividad máxima de áridos de manera de no sobrepasar un límite de degradación impuesto, y el monitoreo de las condiciones de la infraestructura adyacente, pública y privada.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se estudiará los diferentes elementos necesarios para la consecución del objetivo general de esta investigación. Se revisará temas administrativos, hidráulicos, morfológicos y computacionales necesarios para: La realización de una modelación representativa del río Maipo, formulación matemática en relación con los objetivos planteados y posterior resolución en un proceso de simulación optimización.

2.1 SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA DEL ÁRIDO EN CHILE

Según consigna el estudio “Industria del Árido en Chile” realizado por la Comisión Nacional de Áridos, la actividad del árido es de carácter industrial que tiene un desenvolvimiento caracterizado por la variabilidad de la demanda, de acuerdo al comportamiento general de la economía. El sector presenta además una regulación que aún no se consolida, un ordenamiento territorial que aún no define su doctrina sobre el tema y una variedad tipológica de extracciones que no asimilan adecuadamente los aspectos antes citados. (Comisión Nacional de Áridos, 2001)

Las extracciones de áridos pueden realizarse desde Pozos (depósitos cuaternarios, no consolidados), desde Cauces naturales y desde canteras. De acuerdo a la característica temporal de las faenas estas pueden ser permanentes o eventuales. Dependiendo de la magnitud y tecnologías asociadas, los actores se clasifican en industrializados o artesanales, los cuales pueden convivir en una misma zona de extracción. Las faenas y/o extracciones se pueden ubicar en diferentes usos y propiedad del suelo, es así como la actividad se puede desarrollar en áreas urbanas, áreas de expansión urbana, áreas rurales, cauces naturales, y predios privados. Administrativamente existen tres grandes grupos de extracciones, las que presentan un permiso municipal, una concesión municipal o las que funcionan mediante una concesión minera.

Los actores gubernamentales involucrados son los siguientes: Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio de Bienes Nacionales, Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, Ministerio de Economía, Ministerio de Minería y Energía, Ministerio de Agricultura, Ministerio de Salud, Municipalidades, Comisión Nacional del Medio Ambiente, Comisión Regional del Medio Ambiente. Muchas veces, entre ministerios y entre sus departamentos, se persiguen intereses contrapuestos haciendo compleja la labor del Estado y dificultando la consecución de objetivos ministeriales y de bien común.

Producción relativa de Áridos en la Región Metropolitana

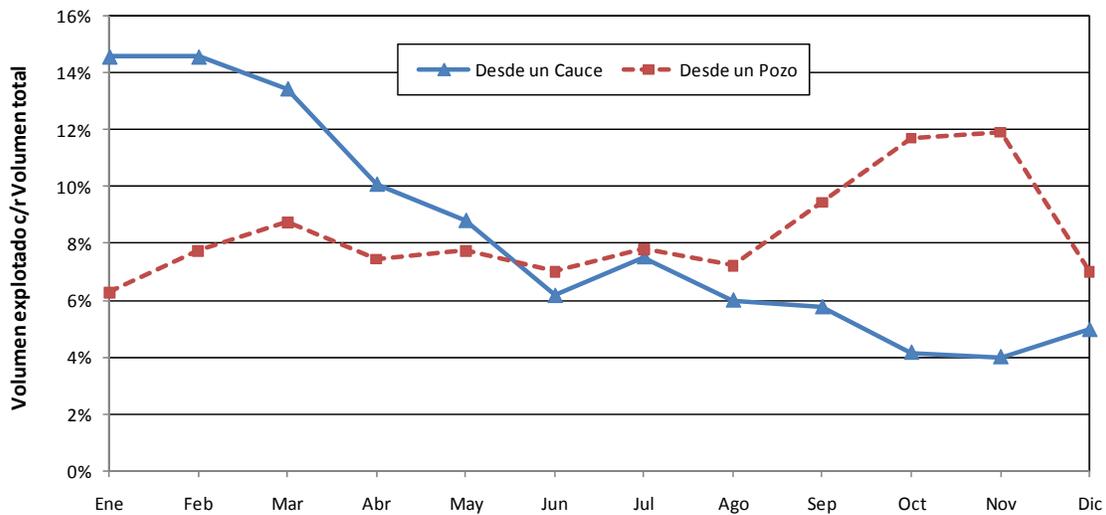


Figura 2.1 Producción típica de áridos (Comisión Nacional de Áridos, 2001)

El segmento de la industria del árido que explota cauces naturales produce áridos todo el año y su volumen anual depende de la situación económica reflejado en la demanda de áridos. Para un año cualquiera, los volúmenes mensuales extraídos respecto del total anual se distribuyen de acuerdo a las curvas indicadas en la Figura 2.1. Se observa que la actividad extractiva, desde los cauces naturales, se concentra en los meses posterior a la crecida estacional, luego de que los ríos de la zona central de Chile han rellenado las zonas de depósito y los caudales han disminuido de manera considerable.

Según indica el estudio “Industria del Áridos en Chile” del año 2001, el 70% de la producción de áridos es en base a la explotación de pozos, siendo el 30% restante ofrecido por los cauces naturales (Comisión Nacional de Áridos, 2001). En cambio, el estudio “Análisis Industrial de los Áridos en la Región Metropolitana”, realizado con fines de caracterización del mercado de áridos, estima los porcentajes de participación de los cauces naturales para diferentes zonas de producción en la región metropolitana. Estos porcentajes resultan en valores cercanos al 50% del volumen total producido en la Región (Aravena y Ruiz, 2000).

Producción estimada de Áridos

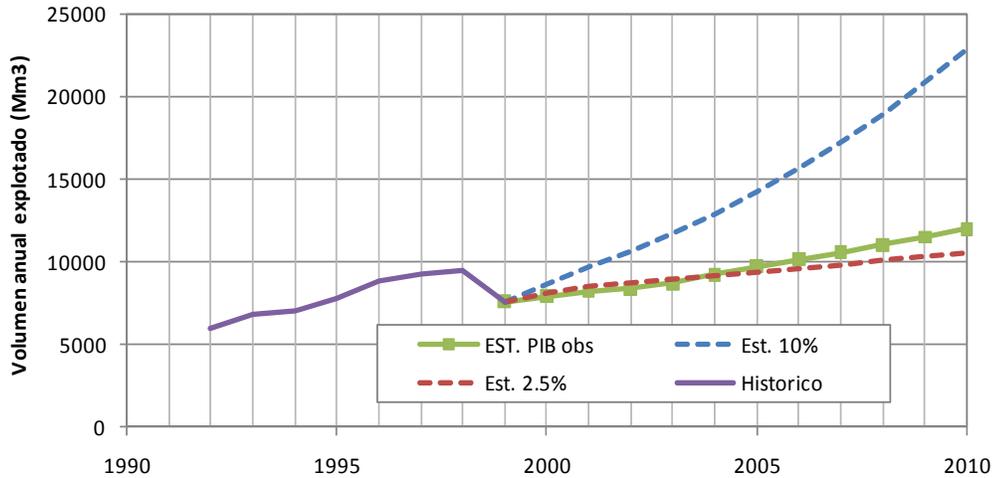


Figura 2.2 Est. Producción anual de áridos en la RM (Comisión Nacional de Áridos, 2001)

La situación histórica reportada en el informe de la Comisión Nacional de Áridos se encuentra en la Figura 2.1, se observa un crecimiento de las extracciones a mediados de los años 90 producto de la bonanza económica y la pujante actividad constructiva en la región metropolitana. Se observa también el efecto de la crisis asiática entre los años 1998 y 1999. A partir del año 1999 no existen datos actualizados, por lo cual se ha elaborado proyecciones sobre la base de diferentes escenarios de crecimiento económico (2.5%, 5.0%, 7.5% y 10.0%). Se muestra en la figura los escenarios extremos y se muestra también una serie inferida de volúmenes explotados de acuerdo con el crecimiento económico observado y su tendencia. Entre los años 2000 y 2008, el crecimiento económico se encuentra entre un 2.2% y un 6.0% anual (<http://www.bcentral.cl>), infiriéndose un volumen de extracción por sobre la serie de menor crecimiento, superándola progresivamente hacia fines de la década.

Según el informe elaborado por la CNA, hacia el año 2010 se espera que el consumo de áridos en la región metropolitana esté entre los 10 y 20 Hm³ de material. La proyección actualizada, estima que el consumo actual (2009) de áridos en la región metropolitana se encuentra cercano los 12 Hm³, se espera que el efecto de la crisis financiera de septiembre del 2008 disminuya esta cifra considerablemente tal como ocurrió en el año 1998.

Debido a la naturaleza extractiva de la industria del árido, esta se encuentra en constante conflicto con otros usuarios del río. Las juntas de vigilancia y las asociaciones de canalistas manifiestan sus preocupaciones principalmente en tiempos de sequía y de riego, quedan plasmadas sus preocupaciones en memorias anuales, en la prensa escrita y la televisión. Muchas veces se toma a la industria del árido como la causante de numerosos problemas (revista del campo, el mercurio 26 enero 2009). Sin embargo, se

olvida que el hecho de que las extracciones de caudal también perjudican la capacidad de transporte de sedimentos y sin lugar a dudas altera los patrones de drenaje del río y potencialmente la efectividad de obras de captación de aguas abajo, teniendo que construir barreras para captar las aguas que por derecho le corresponden a los canalistas. Debiendo ser autorizados por los organismos estatales correspondientes (DOH).

Si bien como regla general el hecho de disminuir el flujo en un cauce podría sugerir una mayor seguridad para obras públicas y privadas, esto no es necesariamente cierto para las condiciones de escurrimiento y morfología del río Maipo. Si consideramos que la alteración de los caudales puede conducir a una desestabilización de islas, canales y riberas del río, además del hecho de que las obras que se ubican en el río Maipo, en general, presentan algún elemento estructural directamente en el cauce, nos encontraremos con un escenario de potencial vulnerabilidad y de riesgo no totalmente cuantificado.

2.2 *NORMATIVA EN LA GESTIÓN DE SEDIMENTOS*

Cómo se menciona en el punto 2.1 son variados los organismos del Estado que se relacionan con las extracciones de áridos desde un cauce. Dependiendo de sus obligaciones los organismos velarán por diferentes aspectos de la industria, por ejemplo:

La ley N°3036 faculta a las municipalidades a otorgar los permisos y cobrar derechos por la extracción de arenas, ripios y otros materiales desde bienes nacionales de uso público, como los son los cauces de ríos, esteros y lagos (artículo 42, N°3). En consecuencia se ha generado un incentivo para otorgar dichos permisos de extracción, con el fin de generar ingresos para la municipalidad correspondiente.

La ley N°11402 del Ministerio de Obras Públicas (MOP) señala que la explotación de ripios y arenas en los cauces naturales se deberá efectuar con permiso de los municipios correspondientes, previo informe favorable del Ministerio de Obras Públicas a través del Departamento de Defensas Fluviales de la Dirección General de Obras Públicas.

Ahora se advierte que el criterio de aprobación de una explotación recae sobre el Departamento de Defensas Fluviales de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del MOP. Este mismo punto se refuerza en la ley N°15840 del MOP (DFL 850 de 1998) la cual en su artículo 14 delega sobre el Director General de Obras Públicas la misión de supervigilar, reglamentar y determinar zonas de prohibición para la extracción de materiales áridos. Tal como se menciona en la ley N°3036 se faculta a las municipalidades para entregar permisos de explotación sobre un bien nacional de uso público.

El Ministerio de Bienes Nacionales (MBN) en su decreto con fuerza de Ley 609 del año 1978 demanda que sea el Departamento de Defensas Fluviales el que informe al Ministerio de bienes Nacionales cuando se otorgue una concesión para extraer arena o ripio del cauce de un río, lago o estero. Más aún dice el DFL 609 del MBN del año 1978. “B.10) al otorgarse las concesiones y permisos mencionados, deberán adoptarse todas aquellas medidas tendiente a evitar perjuicios a los propietarios riberaños, o a las obras de defensa que construyan los particulares o el Fisco, para impedir que se produzcan erosiones o aluviones en los terrenos riberaño, motivadas por el cambios de curso de las aguas”.

El código de Aguas estipula que las personas naturales o jurídicas que desearan efectuar modificaciones en cauces naturales o artificiales con motivo de la construcción de obras públicas, urbanizaciones, edificaciones y otras obras en general, deberán presentar los proyectos correspondientes a la Dirección General de Aguas (DGA) para su aprobación.

En consecuencia con lo anterior se entiende lo siguiente:

Las municipalidades son quienes otorgan los derechos de explotación de áridos en los cauces que pertenezcan a su jurisdicción, son ellas también las que evalúan la pertinencia de la solicitud. Los antecedentes para la aprobación de un permiso deben presentarse en la municipalidad respectiva y con ello esperar a que el Departamento de Defensas Fluviales del Ministerio de Obras Públicas se pronuncie técnicamente sobre la solicitud.

Tabla 2.1 Solicitud de derecho de explotación de áridos desde un cauce natural (MOP, DOH 1998).

Documento	Descripción
Formulario de extracción de áridos.	Datos del solicitante y características fundamentales de la extracción.
Mapa y croquis de ubicación	Ubicación en plancheta IGM 1:25000 o 1:50000, indicando las vías de acceso.
Fotograma aéreo	Fotograma del IGM o SAF, escala aproximada y singularidades
Estudios complementarios	Se deberán incluir al menos los estudios de la Tabla 2.2

Los documentos obligatorios a presentar describen el proyecto en general, detallan las ubicaciones de las faenas y presentan un mínimo de información necesaria para la determinación de medidas de prevención de efectos no deseados, por parte de la DOH. El Departamento de Defensas Fluviales, considerando todos los antecedentes aportados por el interesado (ver Tabla 2.1 y Tabla 2.2), podrá entonces aprobar o condicionar la aprobación del proyecto, si el proyecto presenta un volumen de explotación mayor a 100000 m³ durante su vida útil, o una tasa mayor a 400 m³/día, deberá ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Si la Departamento de Defensas Fluviales considera que el proyecto se emplaza en una zona en la cual existen otras faenas de extracción, se evaluará el efecto complementario, para verificar que en conjunto no se superen los 100000 m³ durante su vida útil (MOP, DOH 1998).

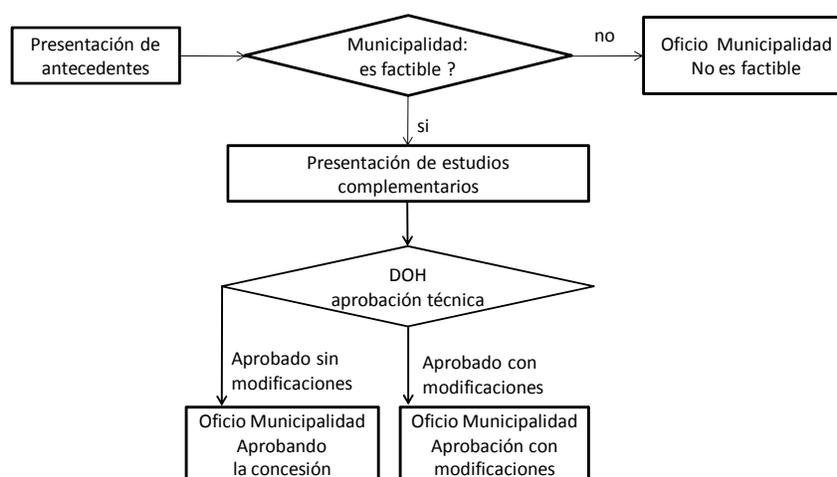


Figura 2.3 Solicitud de concesión municipal para extracción de áridos desde un cauce natural (MOP, DOH, 1998)

Se observa en la Figura 2.3 el diagrama de flujo mediante el cual se tramitan las solicitudes de concesión municipal para la extracción de áridos desde un cauce natural, destacándose 2 etapas, primero la solicitud de factibilidad y luego de acuerdo a la respuesta, la presentación de de los estudios complementarios detallados en la Tabla 2.2.

Estudios Complementarios	Descripción
Levantamiento topográfico del cauce y riberas, plantas y perfiles (Longitudinales y transversales)	Planta: Levantamiento taquimétrico del sector de faena más 500 metros aguas abajo. Perfiles: presentar cotas de fondo y eje hidráulico con y sin proyecto, mínimo 50 fuera del cauce, cada 1/10 de la extensión total de la explotación.
Fotografías aéreas	Queda a criterio de la Departamento de Defensas Fluviales el exigir este punto. Escala entre 1:2500 y 1:1000, mostrando 1km. aguas arriba y 1km. aguas abajo. Detalle de la infraestructura existente.
Análisis Hidrológico	Presentar caudales en el punto de interés medios y máximos Pluviales y Nivales para diferentes probabilidades de excedencia.
Estudio Hidráulico.	Se presentarán los ejes hidráulicos para los diferentes caudales de crecida. Con y sin proyecto.
Estudio de potencialidad de arrastre sólido	Con base en los estudios hidrológicos más información granulométrica y topográfica se deberá generar un potencial de arrastre como volúmenes asociados a una probabilidad de excedencia (95%, 80%, 60%).
Proyecto de defensas fluviales	El Departamento de Defensas Fluviales podrá condicionar la extracción de áridos a la ejecución de defensas fluviales, en su defecto se podrá exigir el compromiso expreso de asumir los costos de los eventuales daños.
Programa de explotación	Se deberá entregar una programación detalladas de las actividades. Volúmenes totales y de rechazo, calendario mensual o anual de explotación, detalle de los procedimientos de extracción, señalar accesos y salidas.
Carta Compromiso	Presentación de un documento donde el solicitante declara su compromiso de asumir todos los riesgos por daños a terceros o

	a la infraestructura existente en el entorno de la explotación derivados de operación inadecuada o incumplimiento del proyecto aprobado.
--	--

Tabla 2.2 Estudios complementarios (MOP, DOH, 1998).

Considerando los estudios y requerimientos complementarios necesarios para la adjudicación de una concesión de extracción de áridos desde un cauce natural, se deduce que para el Departamento de Defensas Fluviales existe la posibilidad de no realizar obras de mitigación previo compromiso de expreso de asumir los costos de eventuales daños, esto significa una tramitación especial y no están claros los criterios bajo los cuales esta situación especial es posible. Quedan dudas también de cuál es el criterio de distancia entre faenas de extracción para realizar la evaluación conjunta.

2.3 MODELACIÓN HIDRÁULICA Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para evaluar los cambios morfológicos y tasas de arrastre de sedimentos se requiere resolver tres etapas, la primera es conocer el eje hidráulico del sistema en estudio, luego se requiere la modelación del transporte de sedimento como función del flujo recién calculado y posteriormente la incorporación de la variabilidad del lecho considerando la ecuación de continuidad del sedimento. En principio, las ecuaciones de transporte de sedimento y evolución morfológica se encuentran acopladas con las de Saint-Venant, pero debido a que las modificaciones morfológicas, con origen en el flujo, ocurren en escalas de tiempo mayores a las de variación del eje hidráulico se admite la separación de ambos procesos.

2.3.1 Cálculo de ejes hidráulicos:

Las ecuaciones de Saint-Venant están compuestas por la ecuación de continuidad y momentum, estas toman la forma general observada en las ecuaciones 2-1 y 2-2 respectivamente, sobre un volumen de control de superficie S y dirección normal \hat{n} y volumen V .

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \int_S \rho(\vec{v} \cdot \hat{n})dS = 0 \quad 2-1$$

$$\vec{F}_s + \int_V \vec{f}_m \rho dV = \int_S \vec{v} \rho(\vec{v} \cdot \hat{n})dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{v} \rho dV \quad 2-2$$

En dónde:

- V : Volumen de control.
- ρ : Densidad del fluido incompresible en cada punto del volumen de control.
- m : Masa total del volumen de control.
- S : Superficie del volumen de control.
- \hat{n} : Dirección normal de la superficie del volumen de control.
- \vec{v} : Vector de velocidad del flujo en el volumen de control.
- \vec{F}_s : Fuerzas que actúan sobre la superficie del volumen de control.
- \vec{f}_m : Campo de fuerzas externas, actúan sobre cada elemento de volumen del fluido.

Las cuatro ecuaciones anteriores (1 en 2-1 y 3 en 2-2) junto a las condiciones de borde del problema, permiten resolver el flujo, campo de velocidades y presiones del fluido.

Debido a limitaciones computacionales, de disponibilidad de información, la escala de los modelos a implementar, se requiere contar con modelos simplificados y eficientes de estas ecuaciones. Es posible reducir las ecuaciones de Saint-Venant, para formular modelos 1D. La simplificación se puede realizar utilizando 2 acercamientos, la integración de las ecuaciones promediadas de Reynolds, utilizando el

concepto de capa límite, resultando en una distribución hidrostática de presiones en la dirección vertical. Otro camino es utilizar el enfoque integral, aplicando las ecuaciones de transporte de Reynolds a la masa y momentum del flujo. En González (2005), se utiliza la forma integral para deducir la formulación unidimensional de las ecuaciones de Saint-Venant.

Las principales consideraciones para su deducción son:

- La profundidad y la velocidad varían sólo en la dirección longitudinal, es decir, en cada sección transversal la velocidad es constante y la superficie de agua es horizontal.
- El flujo es gradualmente variado a lo largo del canal, de tal forma que las aceleraciones verticales pueden despreciarse y la ley hidrostática es válida.
- Los efectos de curvatura del eje longitudinal del canal son despreciables.
- La pendiente de fondo es pequeña y los cambios del lecho son muy lentos comparados con los del flujo (hipótesis cuasi estática).
- Los coeficientes de resistencia para flujo uniforme y permanente son aplicables al caso impermanente no uniforme, de modo que la fórmula de Manning es utilizable para evaluar la resistencia al escurrimiento.
- El fluido es incompresible y de densidad constante a lo largo del flujo.

En la deducción de la ecuación de continuidad 1D se ha realizado la suposición de que los aportes laterales y las infiltraciones son despreciables, obteniéndose:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad 2-3$$

A : Área transversal de escurrimiento en un punto del espacio x y tiempo t .

Q : Caudal que escurre por el área transversal A en el tiempo t y posición x .

Por su parte, en la deducción de la ecuación de momentum 1D se han realizado las siguientes suposiciones:

- Los esfuerzos inducidos por el viento sobre la superficie libre son despreciables.
- La pendiente de la línea de energía puede obtenerse a partir de la ecuación de resistencia de Manning.
- El coeficiente de boussinesq, que relaciona las velocidades locales del flujo con el caudal de escurrimiento, se considera muy cercano a la unidad.

Realizando las consideraciones mencionadas se obtiene la ecuación de momentum 1D, en esta incluye la pendiente de la línea de energía dada por la ecuación de Manning.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A)}{\partial x} = -gA \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{n^2 Q |Q|}{AR_h^{4/3}} \quad 2-4$$

- A : Área transversal de escurrimiento en un punto del espacio x y tiempo t .
- Q : Caudal que escurre por el área transversal A en el tiempo t y posición x .
- n : Coeficiente de rugosidad de Manning.
- R_h : Radio hidráulico de la sección de escurrimiento.

La estimación de ejes hidráulicos o la resolución conjunta de las ecuaciones 2-4 y 2-3 se ha abordado en diferentes *softwares*, entre los que se cuentan:

HEC-RAS desarrollado por el (*US. Corps of Engineers*). Es el más ampliamente utilizado de todos las herramientas de modelación hidráulica, se presenta como un estándar dentro de los trabajos de ingeniería hidráulica. Resuelve la ecuación de energía y en situación de flujos rápidamente variados utiliza la ecuación de momentum. Incorpora dentro de sus opciones facilidades para incluir diferentes tipos de obras de ingeniería, representadas por factores de pérdida de energía singulares. Ha sido especialmente diseñado para resolver redes de flujos abiertos de manera eficiente, considerando geometrías arbitrarias. Conceptualmente es un modelo 1D y toda la variabilidad geométrica es incorporada en modificaciones de la rugosidad de Manning promedio asignada a cada sección, así como en factores de pérdida singulares de acuerdo a fórmulas empíricas. Las singularidades de la red son tratadas utilizando la ecuación de momentum, vale decir, las uniones afluentes, las separaciones, los efectos de obras y barreras. Las simulaciones en régimen impermanente son ejecutadas utilizando el esquema numérico desarrollado por el Dr. Barkau y el *US. Corps of Engineers*.

MIKE11 del “*Danish Hydraulic Institute*”. Es un modelo 1D y se ha documentado que este modelo no resuelve flujos supercríticos, típicos de cauces naturales de alta pendiente como los Chilenos (Astudillo, 2005). Para estos casos el *software* presenta una solución alternativa que surge de modificar la ecuación de momentum, esta modificación permite obtener una ecuación que siempre depende de condiciones aguas abajo y aguas arriba en cada tramo, facilitando la conexión de una red de drenaje. Se ha observado también, problemas de estabilidad numérica producto de la predeterminación del paso de tiempo en el esquema numérico, sin importar las condiciones variables del flujo.

MOSSEM (Gonzalez, Tamburrino y Niño, FCFM). Para resolver el set de ecuaciones hiperbólicas que representan las ecuaciones de Saint-Venant (ver 2-3y 2-4) se planteó un esquema numérico de resolución

explícito no lineal (González, 2005), modificando el esquema numérico propuesto por Ying de manera tal que se considera explícitamente los posibles cambios de dirección del flujo, por ejemplo en embalses.

Las etapas de resolución del esquema numérico de ying modificado son las siguientes:

Cálculo de los flujos en las interfaces.

Solución de la ecuación de continuidad.

Actualización del nivel de superficie libre en nodos interiores y en nodos fantasma.

Definición de la dirección local del flujo para la ecuación de momentum.

Cálculo de los gradientes de superficie libre y ponderadores.

Solución de la ecuación de momentum.

Actualización del caudal en nodos interiores y en nodos fantasma.

Actualización de áreas, velocidad y largo superficial en cada nodo.

El modelo se mostró eficiente y estable en la resolución de diferentes condiciones de flujo, no teniendo que incorporar ninguna consideración especial para la resolución de resaltos impermanentes y otras condiciones de flujo normalmente complejas para el software disponible.

El modelo MOSSEM ha sido desarrollado para evaluar la sedimentación en embalses, la generación de colas de sedimentos y el problema de hidráulica interna de las corrientes de turbidez que en ellos se generan. Su más importante limitación es la limitación a geometría trapecial y el hecho de no resolver rede de flujo, sin embargo es potente resolviendo flujos subcríticos, transcíticos y super críticos.

2.3.2 Transporte de sedimentos

Respecto de la modelación de las tasas de transporte de fondo, existen dos grandes líneas principales de pensamiento la de Bagnold (1956) y la de Einstein (1950).

Bagnold (1956) postula que el gasto sólido de fondo es proporcional al esfuerzo de corte sobre un esfuerzo de corte crítico (movimiento incipiente), esta idea es la base de las fórmulas más populares para la evaluación del transporte de fondo (Meyer-Peter y Müller 1948 y Ackers y White 1973). Para granulometrías extendidas, el proceso de transporte se observa para casi todos los estados del flujo. Indicando un transporte selectivo. El principio de movimiento incipiente es la gran debilidad de las metodologías relacionadas a la hipótesis de Bagnold (González, 2005).

El enfoque de Einstein (1950) considera que el proceso de saltación y por lo tanto el del transporte de fondo, es de naturaleza estocástica. Einstein basa su método en el concepto de “tasa de incorporación” (volumen de partículas que salen del lecho hacia la capa de gasto sólido) y utiliza para modelar este

fenómeno distribuciones de probabilidad, no introduce el concepto de esfuerzo de corte crítico por lo que no existe un umbral mínimo para el transporte de sedimentos (González, 2005 y Niño, 2005). Esta idea desemboca en la formulación del gasto sólido en términos de la distribución granulométrica y también las posteriores refinaciones considerando los complejos fenómenos de sobreexposición y escondimiento (González, 2005).

En González (2005) se ha implementado las formulaciones más comunes utilizadas en ingeniería, estas son Meyer-Peter y Müller (1948), Ackers y White (1973), Parker (1990), Wilcock y Crowe (2003).

La correcta selección de una metodología para el manejo de un cauce natural dependerá de la escala temporal de interés en la gestión, también dependerá de las suposiciones que cada una de ellas realice, “concepto de igual movilidad” por ejemplo. Siempre se deberá tener el cuidado de seguir las recomendaciones hechas por los autores para incluir los efectos de granulometrías extendidas. En ningún caso se deberá, para aplicaciones de ingeniería, confiar plenamente en los valores entregados por una u otra metodología y siempre, de acuerdo a la disponibilidad de datos de terreno, se deberá contrastar estos valores con valores observados (Niño, 2005).

A continuación se procederá a mostrar los gastos volumétricos de sedimentos de acuerdo a la relación de Peter-Meyer y Müller con el fin de aclarar las principales dependencias del transporte de fondo.

$$q_s^* = 8(\tau_{50}^* - 0.047)^{3/2} \quad 2-5$$

$$\tau_i^* = \frac{\tau}{\rho g R D_i} = \frac{\rho g R_h S_f}{\rho g R D_i} = \frac{R_h S_f}{R D_i} \quad 2-6$$

q_s^*	:	Caudal de sólidos que atraviesa la sección por unidad de ancho.
τ_{50}^*	:	Representa el esfuerzo de corte adimensional asociado al tamaño característico, actuando en el fondo.
R_h	:	Es el radio hidráulico de la sección.
S_f	:	Es la pendiente de fondo.

El límite sobre el cual existe transporte de fondo, según Peter-Meyer y Müller, se asocia al límite en que el factor τ_{50}^* supera el esfuerzo de corte adimensional crítico (0.047). Por otro lado la cantidad τ_{50}^* depende de las condiciones del flujo a través del radio hidráulico y la pendiente de fondo.

Considerando un ancho de cauce de 25 metros, con taludes 5/1 (h/v), altura normal, rugosidad de Manning dada por la relación de Strickler, se ha confeccionado los gráficos de la Figura 2.4, evidenciando la dependencia del transporte de fondo respecto de la pendiente longitudinal (0.25% a 2.25%) y el tamaño característico de los sedimentos (2.0cm a 32cm). Se ha incluido un gráfico que relaciona el esfuerzo de corte adimensional con el caudal, para indicar los caudales límites a partir de los cuales se generará transporte de fondo según la relación de Meyer-Peter y Müller.

Se observa en la Figura 2.4 la dependencia del gasto volumétrico sólido frente a las variaciones de pendiente (columna izquierda), se observa por ejemplo que para un caudal de $500\text{m}^3/\text{s}$ el caudal sólido varía entre $0.001\text{ m}^3/\text{s}$ y $2.5\text{m}^3/\text{s}$ dependiendo de la pendiente (0.25% a 2.25%) así mismo se observa que la reducción del caudal límite es cada vez menor a medida que se presentan mayores pendientes. Las curvas de esfuerzo de corte muestran que aumentar el caudal (manteniendo la pendiente) significa un aumento del esfuerzo de corte, así mismo, al aumentar la pendiente (manteniendo el caudal) se observa un aumento del esfuerzo de corte. Disminuir el tamaño característico de los sedimentos significa facilitar el transporte de sedimentos aumentando el esfuerzo de corte adimensional.

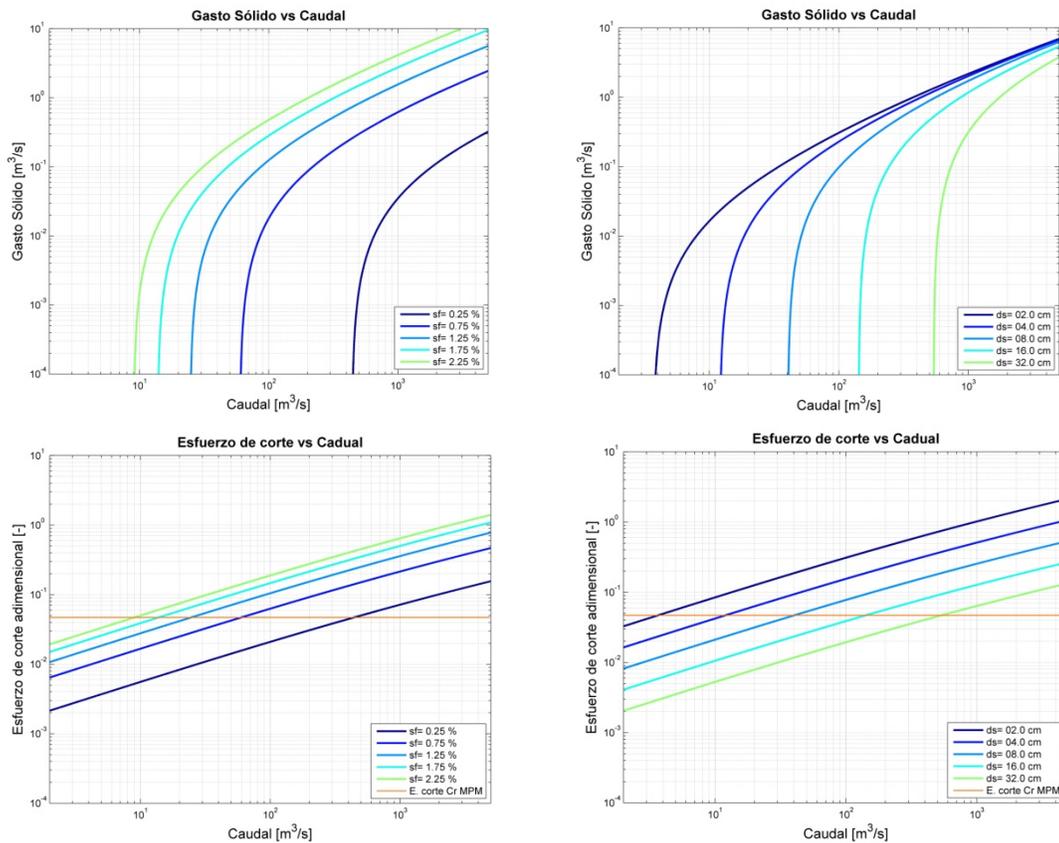


Figura 2.4 Gasto volumétrico vs caudal y esfuerzo de corte v/s caudal (MPM)

2.3.3 Evolución del lecho:

Una vez resuelto el eje hidráulico para un tiempo determinado, se puede acoplar un modelo de transporte de sedimentos, que resuelve la ecuación de Exner utilizando una hipótesis cuasiestática. Esta suposición se basa en el hecho de que las escalas de tiempo asociadas a uno y otro fenómeno son diferentes, es decir, los cambios experimentados en el borde móvil son mucho más lentos que los experimentados en el eje hidráulico, de tal manera que es válido actualizar en el próximo paso de tiempo la condición de borde (fondo) de acuerdo con la ecuación de continuidad de sedimentos, ecuación 2-7.

La ecuación 2-7 se puede presentar de diferentes maneras, relacionando la variación temporal del gasto másico sólido con las diferencias espaciales del gasto másico sólido. Utilizando la densidad del sedimento y la porción de poros, se expresa la ecuación de continuidad como la relación entre el cambio de área en el tiempo y variación del caudal sólido en el espacio, ecuación 2-8.

Ecuación de continuidad de sedimentos

$$\frac{\partial m_s}{\partial t} = Gs|_x - Gs|_{x+dx} \quad 2-7$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda_s} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad 2-8$$

La ecuación de continuidad de sedimentos, ecuación de Exner, presenta la complejidad de la modelación de Q_s para la integración de los cambios morfológicos.

2.4 MORFOLOGÍA

El Transporte hidráulico de sedimentos es una de tantas formas de transformación y transferencia de energía. La energía potencial, dada por las cotas de la cordillera de los Andes, es transformada en energía cinética al movilizar las aguas hacia terrenos más bajos. En su camino encuentra la resistencia de la rugosidad del cauce y por diferentes mecanismos se transfiere esta energía mecánica hacia el sedimento la cual es disipada en diferentes procesos, abrasión, molienda, producción de ondas de presión, calor, etc.

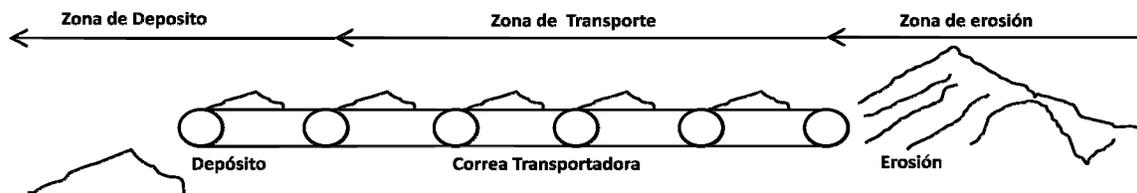


Figura 2.5 Correa Transportadora (Kondolf, 1994)

Desde un punto de vista general se observa que los sedimentos producidos por meteorización de la Cordillera de los Andes (zona de producción de sedimentos) son transportados por cauces (Zona de transferencia) hacia zonas más bajas formando en su paso diferentes estructuras e interactuando con el flujo para ser finalmente depositados o arrastrados hacia el océano o nivel base (zona de depositación). Este concepto llamado correa transportadora (Schumm, 1977) ilustrado en la Figura 2.5 explica en términos generales el fenómeno del transporte de sedimentos, pero esconde la complejidad de las estructuras y procesos intermedios, de menor escala temporal (Envicom, 1979).

Se observan en la Figura 2.6 las plumas de sedimento fino que han sido transportadas hacia el nivel base algunas de las cuencas del centro sur de Chile. Por el norte (arriba) se observan la pluma correspondiente al río Maule, en el centro de la figura, al norte del golfo de Arauco, se muestra una intensa pluma de sedimentos correspondiente del río Bio-Bio y por el sur se observa los sedimentos asociados al río Imperial.

Según cita Quiroz (Quiroz, 2001) desde *fluvial hydrosystems*: “Los cauces naturales son sistemas variables en el tiempo y en el espacio que, en escalas de tiempo del orden de 10 a 10^4 años se ajustan de

acuerdo a factores geomorfológicos (fisiografía, geología), hidrológicos (régimen hidrológico y magnitud de parámetros hidrológicos), sedimentológicos (propiedades del material del lecho y morfología del cauce) e hidráulicos (caudal, parámetros de la sección transversal, pendiente de fondo y rugosidad). Estos factores se asocian en un sistema de proceso-respuesta con ciclos de retroalimentación.”

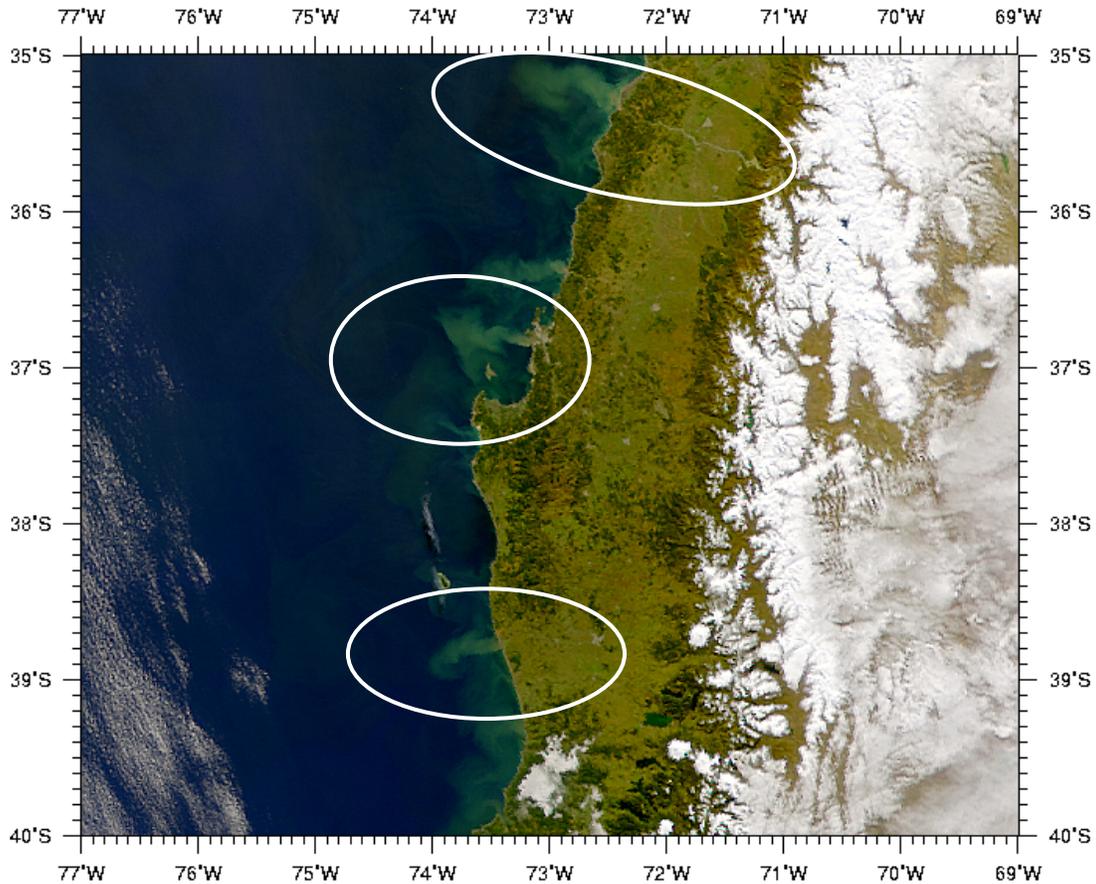


Figura 2.6 Pluma de Sedimentos en costas chilenas (“Earth Observatory”)

En la zona central de Chile, El nacimiento de los principales ríos se produce en las altas cumbres de la cordillera de los Andes, lo cual, junto a la forzante climática, estacional y de sistemas frontales, determina su régimen de escurrimiento. Los diferentes afluentes se van uniendo mientras escurren por valles fluviales (en “V”) de pendientes importantes (cauces típicamente jóvenes). Estos ríos de régimen propiamente nival y mantienen una gran capacidad de arrastre de sedimentos tanto en suspensión como de fondo. Al avanzar hacia los valles, las pendientes de sus cauces, áreas aportantes y régimen hidrológico cambian (zonas pluviales, menores pendientes), cambiando la capacidad de arrastre y haciendo mixto el régimen escurrimiento.

Existen diversas maneras de clasificar cauces naturales, una de ellas más enfocada en la capacidad erosiva, otra orientada al patrón de planta observado y en otra se ha hecho un esfuerzo por relacionar el patrón de

planta y la estabilidad del cauce con el régimen dominante de transporte de sedimentos (fondo v/s suspensión) (Niño, 2005).

Esencialmente existen dos tipos de cauces naturales, unos en que el flujo tiene libertad para interactuar con el medio, llamados cauces aluviales, y otros en los cuales el flujo se encuentra restringido por el medio, sin posibilidades de que modifiquen el entorno, llamados cauces de lecho rocoso. En cauces aluviales se distingue gran variedad comportamientos y estructuras, tanto en planta como de fondo. Respecto de la predicción de ondas sedimentarias, la relación de aspecto en cauces naturales separa en dos vertientes los estudios la generación de formas de fondo u ondas sedimentarias. En una vertiente la relación de aspecto (B/h), ancho del cauce sobre profundidad de escurrimiento, es cercana a la unidad y en la otra la relación de aspecto es mucho mayor que la unidad y los efectos viscosos son despreciados (Niño, 2005).

2.4.1 Erosión producto de incisión en el lecho

Las altas pendientes y la erosión de la cordillera de los Andes, permiten la formación de reconocidas zonas de depósito de material grueso y el arrastre de finos hacia el nivel base de las cuencas (nivel del mar). A medida que se avanza en el desarrollo del río las pendientes típicas van disminuyendo y sus caudales aumentando, esto trae consigo una disminución de las velocidades medias.

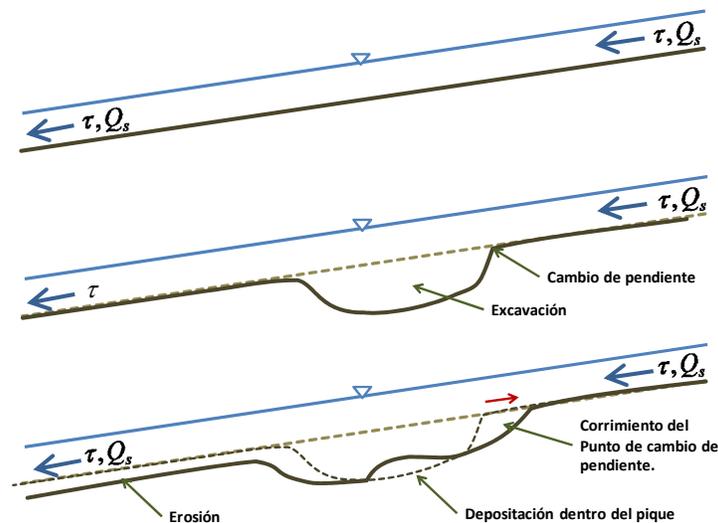


Figura 2.7 Esquema de pique y erosión retrograda (Kondolf, 1993)

Cuando un cauce natural es intervenido, como lo es en el caso de la industria del árido del Chile central, el cauce experimenta deformaciones y perturbaciones en su geometría, estructura de flujo, velocidades y relación con el medio por el cual fluye. En la Figura 2.7 se muestra un esquema conceptual del proceso de erosión provocado por una profundización súbita y profunda del lecho del río.

2.4.1.1 Descripción de efectos hacia aguas arriba

Los efectos hacia aguas arriba se propagan con la celeridad del punto de cambio de pendiente (*knick point*) (indicado con flecha roja en la Figura 2.7). El punto de cambio de pendiente es un punto de aceleración del flujo, generándose mayores esfuerzos de corte, a la vez que el lecho es menos resistente producto del cambio geométrico. Luego de remover el sedimento asociado al punto de cambio de pendiente, el flujo los deposita en el interior de la incisión junto con los sedimentos que son transportados desde aguas arriba. Es el cambio de velocidad lo que produce el efecto de sedimentación. Lentamente el pique se irá rellenando y suavizando los cambios de pendiente, migrando el punto de cambio de pendiente de aguas arriba y erosionando hacia aguas abajo. Estas perturbaciones pueden viajar kilómetros (Kondolf, 1997) generando descensos considerables en el cauce afectando las estructuras emplazadas sobre él. La incisión puede desestabilizar las riberas y/o laderas de cerros rodeados por cauce en cuestión.

2.4.1.2 Descripción de efectos hacia aguas abajo

Hacia aguas abajo, luego de depositar sedimentos en el pique, producto del cambio en las condiciones de flujo, se produce un fenómeno erosivo denominado por Kondolf (1997) como “aguas hambrientas”. El fenómeno erosivo se produce porque el flujo que antes se encontraba en equilibrio dinámico ha perdido, repentinamente, su carga de sedimentos. La geometría hacia aguas abajo no ha cambiado, por lo tanto su potencial arrastre de sedimentos es similar preexistente. El flujo presenta una déficit de sedimentos, en este estado comienza el proceso de erosión hacia aguas abajo. El flujo a medida que va arrastrando y depositando material, afecta el lecho hasta una longitud que en que un nuevo equilibrio se logre, distancia que puede ser del orden de kilómetros. El lecho aguas abajo va siendo deprimido, exponiendo granulometrías más gruesas, que no permiten el transporte de fondo, el lecho se ha acorazado, por lo tanto el efecto erosivo se moviliza hacia aguas abajo generando un descenso progresivo de las cotas de fondo del cauce.

2.5 EXTRACCIÓN DE SEDIMENTOS

Existen diferentes formas de materializar una extracción de áridos desde un cauce natural, entre estas técnicas se cuentan la extracción de arenas desde bancos areneros, la extracción de material integral desde cauce de río y la extracción artesanal selectiva. La elección de una u otra técnica dependerá de la morfología del río y del tipo de actividad (industrial o artesanal).



Figura 2.8 Extracción de sedimentos en el río Maipo, desde banco arenoso (“Google Earth”)

En la Figura 2.8 se observa una trampa de sedimentos, banco arenoso, construida parcialmente en el cauce del río Maipo en las cercanías de la localidad de San Alfonso, aguas arriba de la quebrada La Calchona. Sus dimensiones en planta son 130 m. en sentido longitudinal y de ancho 20 m, su operación requiere maquinaria pesada la cual periódicamente vacía el contenido depositado.

Este tipo de explotación se utiliza preferentemente en zonas donde la tasa de arrastre es alta (pendiente alta) y en donde se presentan cauces encajonados. Las alteraciones que se pueden esperar de este tipo de extracciones van desde cambios geométricos de la sección hasta la desestabilización de laderas producto del cambio de los patrones de flujo y del balance de sedimentos, la profundización del cauce y acorazamiento del lecho (Kondolf, 1994).



Figura 2.9 Extracción de sedimentos desde bancos ribereños (“Google Earth”)

En la Figura 2.9 se observa una compleja faena de extracción de áridos aguas arriba del cruce del río Maipo con Ruta 5, extracción de material integral y depositación de rechazos en riberas. Se observan las marcas dejadas por la extracción de áridos directamente desde la superficie de la ribera. Este tipo de intervención presenta problemas pues remueve una capa vegetal incipiente y expone una capa de sedimentos gruesos, posiblemente debilitando la pobre resistencia de estas formaciones. Se asocia a esta forma de extracción cambios importantes en los patrones de flujo, poniendo en riesgo la estabilidad del cauce (Kondolf, Piégay, Landon, 2002). Su influencia será gradual y conceptualmente consiste en modificar las propiedades de rugosidad y resistencia mecánica de la planicie de inundación, así como el balance de sedimentos (Kondolf, Smeltzer y Kimbal, 2002). Esta modificación dejará ver su influencia cuando un gran caudal inunde estas zonas.

En sectores alejados, en los cuales no se cuenta con energía suficiente para los procesos de chancado sino que sólo para procesos de selección, se observa la situación evidenciada en la Figura 2.10, gran porcentaje del material extraído del cauce es rechazado, generándose rellenos con material de rechazo en las riberas del río. Las imágenes corresponden a la situación actual del río Maipo en el extremo inferior de su primera sección, en las cercanías del recientemente inaugurado puente Lonquén.



Figura 2.10 Acumulación de rechazos en riberas del río Maipo (“Google Earth” & fotografía por el Autor)

2.6 OPTIMIZACIÓN- SIMULACIÓN.

Se describe a continuación la utilización de un algoritmo genético ligeramente modificado del tradicional, con el propósito de adaptar una población para obtención de un desempeño óptimo en un problema de optimización general. Se describirá cada etapa del proceso evolutivo en cuestión.

2.6.1 Introducción

Se presentan en la literatura tres grandes grupos de técnicas de búsqueda de óptimos, existen los métodos analíticos, los métodos enumerativos y los métodos aleatorios (Rutkowski, 2008). Los métodos analíticos se dividen en dos clases y estos son los métodos directos y los indirectos. Los métodos analíticos directos son aquellos en que se va aproximando la solución en la dirección del gradiente, consiguiendo un máximo local de la función objetivo. Los métodos analíticos indirectos se presentan como una técnica en que se plantea y resuelve un sistema de ecuaciones, por lo general no lineal, encontrando una solución local al igual que en el método analítico directo. El sistema de ecuaciones se plantea imponiendo un gradiente nulo en la función objetivo.

Los métodos enumerativos consisten en discretizar el espacio de búsqueda, asignar a cada posible solución su función objetivo y luego comparar los candidatos, presentan una gran deficiencia y es que en la gran mayoría de los problemas el espacio de búsqueda es tan grande que se hace poco efectivo encontrar una solución con solo probar candidatos.

Finalmente, los métodos aleatorios consisten en utilizar la aleatoriedad, no para probar casos aleatoriamente, sino que para guiar, sin reglas rígidas, una búsqueda de acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente, una evolución en términos darwinianos.

Al abordar un problema de optimización multivariado, se debe necesariamente abordar el problema de la selección de una técnica adecuada de optimización. Para el tipo de aplicaciones en adelante descritas se requiere de una técnica que sea eficiente en las condiciones que se describen a continuación:

1. Se desconocen los márgenes del espacio de búsqueda.
2. Se desconoce las propiedades (convexidad, continuidad) del espacio factible. Es impracticable escribir las ecuaciones del modelo de simulación como restricciones del problema de optimización.

Tal como menciona Mitchell y Forrest (1993) citando a De Jong (1990) “el punto clave para decidir la utilización de algoritmos genéticos se centra en la pregunta ¿cómo es el espacio de búsqueda?, si este espacio de búsqueda es bien conocido y la estructura de las restricciones se puede explotar mediante alguna técnica ad-hoc, entonces la utilización de algoritmos genéticos es típicamente menos eficiente. Si, por el contrario, el espacio de búsqueda no es del todo conocido y relativamente no estructurado y se puede elaborar una representación eficiente de ese espacio, entonces los algoritmos genéticos proveen de una sorprendentemente poderosa heurística para grandes y complejos espacios de búsqueda.”.

En problemas de difícil resolución matemática se ha utilizado con éxito los llamados algoritmos evolucionarios, en particular se han aplicado los algoritmos genéticos en áreas tan diversas como la acústica, ingeniería aeroespacial, astronomía y astrofísica, química, ingeniería eléctrica, mercados financieros, juegos, geofísica, ingeniería de materiales, matemáticas, tácticas militares, biología molecular, reconocimiento de patrones, robótica, diseño de rutas y horarios (Marczyk, 2004).

A continuación describe los principios de funcionamiento y las diferencias fundamentales de los algoritmos genéticos respecto de otros métodos de optimización.

2.6.2 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos forman parte de una gama de algoritmos llamados evolucionarios, entre los cuales se cuentan. Los algoritmos genéticos clásicos, las estrategias evolutivas, la programación evolutiva, y la programación genética (Rutkowski, 2008). Cada una de estas técnicas se inspira en la naturaleza y la imitan induciendo un mejoramiento de su desempeño.

Los algoritmos genéticos fueron inventados por John Holland y su equipo en la década de los 60 en la universidad de Michigan, momento en el cual existía una relación profunda entre la biología y ciencias de la computación. Originalmente fueron diseñados para estudiar formalmente el fenómeno de adaptación en la naturaleza (Mitchell, 1996).

Todos los organismos viven en un cierto ambiente y en cada generación de individuos se plantea la necesidad de traspasar los genes responsables de características que han condicionado su supervivencia hacia nuevas generaciones. La reproducción es la responsable de que los genes se traspasen y por lo tanto las características se hereden y mezclan. Las nuevas generaciones cuentan con la información de las generaciones anteriores para sobrevivir, la mezcla permite nuevas combinaciones que pueden resultar en individuos más aptos y si así mejorar sus posibilidades de supervivencia, también existe la posibilidad de mutaciones, procesos fortuitos, que de vez en cuando agregan alguna componente que mejora las posibilidades del individuo afectado.

Las principales diferencias respecto de otras técnicas de búsqueda óptimos basados en gradientes, recaen en lo siguiente:

1. No se manipula los parámetros directamente sino su forma codificada.
2. La búsqueda comienza desde una población y no desde un individuo.
3. Sólo se requiere evaluar la función objetivo y no sus derivadas u otra información.
4. Las reglas de selección son probabilísticas y no determinísticas.

Estos hechos hacen de los algoritmos genéticos una herramienta potente, robusta.

Al utilizar algoritmos genéticos se requiere definir, en este contexto, conceptos originarios de la genética. Términos como: población, individuo, fenotipo, genotipo, cromosoma, gen, alelo, locus.

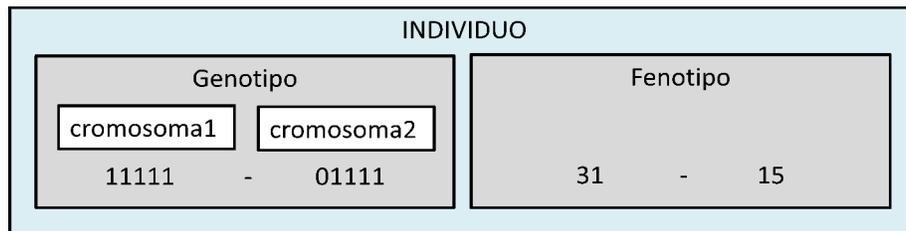


Figura 2.11 Individuo, conceptos en algoritmos genéticos clásicos.

Tal como se muestra en la Figura 2.11 se observa que existen 2 representaciones de un mismo individuo, el fenotipo y el genotipo, y se interpretan en diferentes planos de acción. Incluso podría ser que en problemas y formulaciones más complejas hubiese 2 fenotipos para un mismo genotipo, como lo es el caso de gemelos “idénticos” homocigóticos.

Concepto		Definición
Población	:	Conjunto de individuos.
Individuo	:	Elemento único de una población, tiene 2 representaciones, Fenotipo y

Concepto		Definición
		Genotipo.
Fenotipo	:	Conjunto de valores decodificados de los cromosomas de un individuo. La expresión de su material genético.
Genotipo	:	Conjunto de los cromosomas, material genético.
Cromosoma	:	Conjunto de genes que determinarán el valor de un parámetro al ser decodificados.
Gen	:	Elemento de un cromosoma, o genotipo. Tiene valor binario.
Alelo	:	El valor específico de un gen, es un 0 o un 1.

Tabla 2.3 Definición de conceptos en algoritmos genéticos

La Tabla 2.3 muestra las definiciones básicas a entender el funcionamiento de los algoritmos genéticos. Un candidato a solución es representado (genéticamente) por su genotipo, usualmente se utiliza una codificación binaria. La larga secuencia de valores binarios se divide en cromosomas y luego en genes, cada gen es responsable de codificar una característica del individuo. En muchos casos se utiliza individuos en la cual cada cromosoma está formado por un gen.

En la Figura 2.12 se muestra el diagrama de flujo típico de un algoritmo genético. Comenzando con una población inicial (aleatoria) se inicia el proceso evolutivo, la población es evaluada y se le asigna a cada individuo el valor de la función correspondiente (aptitud o *“fitness”*). El proceso continúa con la verificación del criterio de detención y es en este punto donde se decide si dar por terminado el proceso evolución, presentando el mejor individuo, o si es necesario iniciar un nuevo proceso de selección (aleatorio). La selección es hecha tomando en cuenta los resultados obtenidos en la etapa de evaluación. Habiendo seleccionado los individuos que darán origen a la nueva generación, se procede a elegir parejas y mezclarlos de acuerdo a la implementación de operadores genéticos (*“crossover”* y mutación) y parámetros de funcionamiento del algoritmo. Una vez ejecutados los operadores genéticos, se dará paso, nuevamente a la evaluación de la generación.

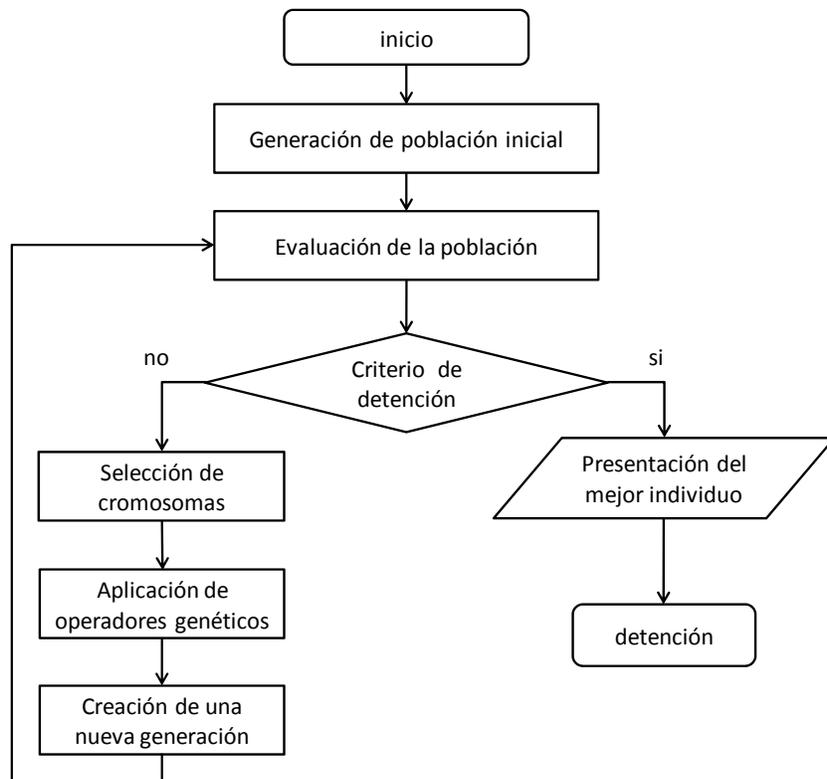


Figura 2.12 Diagrama de flujo de algoritmo genético.

A continuación se detalla el funcionamiento de cada una de las etapas del algoritmo genético.

2.6.2.1 Pasos previos a la inicialización del algoritmo genético.

En un algoritmo genético tradicional, se debe conocer, asumir, o fijar los límites iniciales de búsqueda, es decir, se debe acotar el espacio de búsqueda, al menos en una primera instancia. No obstante, estos límites pueden variar en el tiempo de acuerdo a la evolución registrada.

2.6.2.2 Generación de una población inicial

La generación de una población inicial se refiere a la construcción de individuos quienes por primera vez serán evaluados y asignadas sus funciones de aptitud o “*fitness*”. La técnica más popular para la generación de una primera población es la aleatoria, en ausencia de información acerca del problema, esta técnica es la más ampliamente utilizada. Se han registrado esfuerzos por mejorar la construcción de una población inicial. Se ha utilizado, por ejemplo, números cuasi aleatorios, logrando un espaciado homogéneo en el espacio de búsqueda, y obteniendo resultados prometedores referentes a la reducción del tiempo de ejecución y la función objetivo (Maaranen et al, 2004).

Una posibilidad es introducir información del sistema, probando algunos límites iniciales y utilizarlos para la generación de una población inicial. Si los límites iniciales resultan insuficientes, se podrán modificar en el proceso, pero en esa etapa ya los individuos habrán “heredado” algunas características del desempeño de sus antepasados quienes vivieron en el mismo sistema.

2.6.2.3 Evaluación de una población:

Conociendo el conjunto de individuos que forman la población, se procederá a la evaluación de la aptitud o “*fitness*” de cada uno de ellos. Esto permitirá seleccionar los más aptos para la posible replicación y combinación de su genotipo. Esta etapa de aparencia sencilla es la más costosa computacionalmente.

Un punto de importancia capital, usualmente pasado por alto, es el hecho de que los algoritmos genéticos son métodos de búsqueda en problemas sin restricciones salvo acotamiento de las variables de decisión (variables codificadas) y por el contrario normalmente se encuentran restricciones en problemas de optimización reales, por lo que es necesario incorporarlas, de manera adecuada, a la función objetivo (Coello, 2001). Tal como menciona Coello (2001) existen variedad de técnicas para el manejo de las restricciones y se presenta como un espacio fértil de publicaciones.

El manejo de restricciones o de infactibilidad de los individuos se aborda desde diferentes miradas, entre las cuales se cuentan: las funciones de penalización, las representaciones y operadores especiales, los algoritmos de reparación, la separación de objetivos y restricciones y los métodos híbridos. Las funciones de penalización son las más ampliamente utilizadas para el manejo de restricciones en ámbito de los algoritmos evolucionarios. Entre ellas se distinguen categorías diferentes de acuerdo a su comportamiento durante el proceso evolutivo. Las diferentes categorías que se observan son: la penalización estática (“Static penalty”), la penalización dinámica (“Dynamic penalty”), la penalización basada en templamiento (“Annealing penalty”), la penalización adaptativa (“Adaptive penalty”), la penalización co-evolucionaria (“co-evolutionary penalty”) y la “pena de muerte” (“Death penalty”).

Tipo de penalización	El valor de la función de penalización:
Estática	No depende de la generación.
Dinámica	Se eleva en función de la generación
Adaptativa	Varía de acuerdo a los resultados obtenidos en la generación.
Basada en templamiento	Varía progresivamente hasta un punto de congelamiento de acuerdo a un esquema de “enfriamiento”.
Co- evolucionarias	Será determinado por dos coeficientes que irán evolucionando junto con las poblaciones. Para esto se requiere 2 poblaciones, una de soluciones

	candidatas y otra de coeficientes.
Penal de muerte	Se definirá de acuerdo a la infactibilidad del individuo. Se descartarán los individuos infactibles.

De manera formal se muestra en el cuadro siguiente la transformación de un problema de optimización con restricciones en otro “equivalente” y sin restricciones, al utilizar parámetros r_i , β , c_j y γ constantes se obtiene una penalización estática.

$$\begin{array}{ll}
 \text{MAX } f(\bar{x}) & \text{MAX } f(x) - \sum_{i=1}^n p_i - \sum_{j=1}^p l_j \\
 \text{Sujeto a:} & \text{Donde:} \\
 g_i(\bar{x}) - b_i \leq 0 \quad i = 1, \dots, n & p_i = r_i \cdot \max[0, g_i(\bar{x}) - b_i]^\beta \quad i = 1, \dots, n \\
 h_j(\bar{x}) - k_j = 0 \quad j = 1, \dots, p & l_j = c_j \cdot |h_j(\bar{x}) - k_j|^\gamma \quad j = 1, \dots, p
 \end{array}$$

La principal dificultad radica en escoger o determinar correctamente los coeficientes r_i, β, c_j y γ de manera tal que el óptimo del problema alternativo sea efectivamente factible en el problema inicial y por lo tanto la solución del problema original.

Se muestra, a modo de ejemplo, en la Figura 2.13 en el gráfico superior una función objetivo $f(x)$ y su equivalente alternativo $f(x) - p(x)$. En el gráfico inferior de la figura se muestra la restricción $g(x) \leq b$, no lineal, y la función de penalización $p(x)$ asociada a la violación de la restricción. La función de penalización tiene valores positivos sólo en los puntos donde se satisface la condición $g(x) > b$, y valores nulos en la zona factible. En este caso, tanto la función objetivo como la restricción son no lineales, originando que la región factible sea inconexa. El ejemplo representa un problema típicamente difícil para los métodos basados en gradiente implementados para la resolución de problemas de optimización.

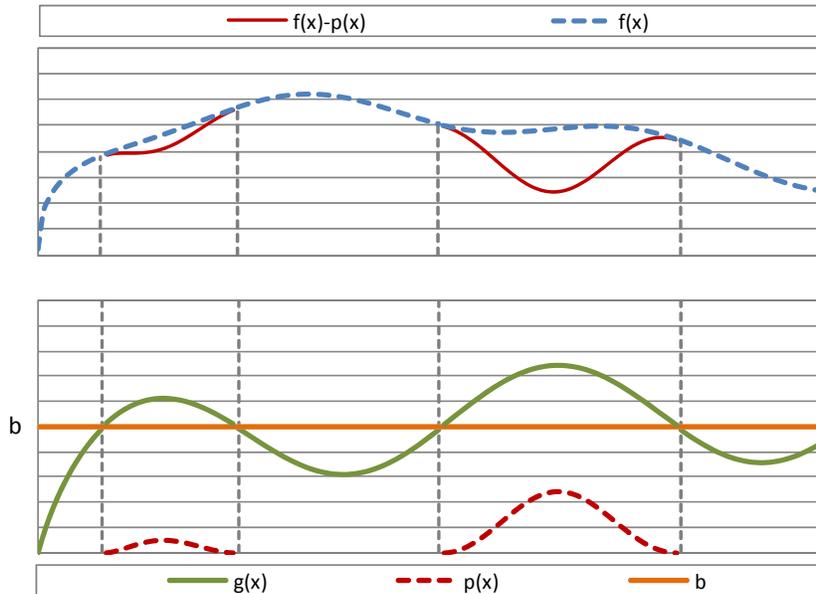


Figura 2.13 Función objetivo y penalización.

La estrategia de penalización por violación de restricciones debe enfrentarse antes de comenzar el proceso de evolución, para esto se debe necesariamente tener información del problema, analizar la estructura de la función objetivo y de las variables relevantes del problema.

2.6.2.4 Criterio de detención:

Este punto del proceso representa una bifurcación en el diagrama de flujo del algoritmo genético, la selección de un criterio conveniente de detención dependerá del problema.

En general, el criterio de detención puede variar dependiendo del problema, en casos donde es conocido el valor óptimo a alcanzar, parece natural considerar que la detención se realizase al alcanzar dicho valor, o se encuentre a cierta distancia (tolerancia) de ese valor. En otros casos donde no se conoce el valor deseado, sino que se busca mejorar una función objetivo, el criterio de detención podrá combinar alguno de los siguientes aspectos: Cantidad de generaciones evaluadas, criterios de avance en la función objetivo, tiempos totales de simulación. Cualquiera de aquellos criterios requiere la comparación y almacenamiento de variables que pasan de una generación a otra y se actualizan de acuerdo a lo necesario.

La eficiencia, para producir una detención oportuna, del criterio de detención dependerá de la forma de la función objetivo. Es así, puesto que el principio base del funcionamiento de los algoritmos genéticos es el de selección, en consecuencia, si una función objetivo que no diferencia los individuos (función relativamente plana) no permitirá una selección eficiente.

Un criterio muy utilizado es el de mínimo avance. Dado el carácter aleatorio de los algoritmos genéticos, el criterio de mínimo avance involucrará la contabilización de la cantidad de generaciones sin avance “significativo”, siendo “significativo” un parámetro de funcionamiento del algoritmo.

2.6.2.5 Selección de Cromosomas

Es en esta etapa en donde los principios de evolución toman importancia capital, la selección de un progenitor es aleatoria, siendo influida por el desempeño obtenido. Los individuos con mayor función objetivo, aptitud o “*fitness*” son los que tendrán mayor probabilidad de ser escogidos como progenitores.

Existen diferentes estrategias para la selección de los individuos que formarán la llamada “*mating pool*”, o lugar desde donde se escogerán los progenitores de la generación futura.

Método rueda de ruleta:

Los individuos son seleccionados en forma aleatoria y proporcional al valor de su función “*fitness*”. El número esperado de veces en que es seleccionado un individuo es simplemente el producto de la esperanza de producir un número aleatorio en el intervalo que le corresponde al individuo i por la cantidad de veces en que se selecciona.

Método “Ranking”:

Se utiliza en este método una función (N° selecciones v/s ranking) en que se define el número de veces en que se selecciona el individuo como función del ranking asociado. Permite ser fácilmente implementado en problemas de maximización y minimización.

Método “Tournament”:

El conjunto total de individuos evaluados se divide en subconjuntos de 2 o 3 individuos de los cuales se seleccionan, determinística o estocásticamente, los mejores de cada subgrupo, los cuales son enviados al “*mating pool*”. Este método presenta algunas propiedades que lo hacen bastante popular. Es una regla que permite conservar diversidad en los genes, evitando problemas de convergencia prematura, Es sencillo implementar la modalidad estocástica. Es relativamente sencillo extenderla a la optimización multiobjetivo.

Otros métodos de selección:

Existe variedad de métodos de selección, fundamentalmente combinaciones y caso particulares de los ya descritos. Como lo son el caso del “*threshold selection*” (caso particular de ranking) y el “*crowding selection*”, este último intenta mantener la diversidad genética utilizando una norma para definir la cercanía de los individuos.

2.6.2.6 Aplicación de operadores genéticos:

Para conformar la siguiente generación de individuos se puede optar por diferentes técnicas no relacionadas directamente a los operadores genéticos, como lo son el “elitismo” y el reemplazo parcial de la población.

Elitismo

Esta técnica protege al mejor individuo, considerándolo dentro la siguiente generación, las ventajas de esto es que nunca se pierde la información del mejor individuo y más aún se introduce un sesgo genético que estabilizará la producción de potenciales nuevos casos. El elitismo es de utilidad cuando no se conoce la sensibilidad del problema frente a las tasas de mutación. Se muestra en el gráfico superior de la Figura 2.15 el efecto de admitir elitismo y de no hacerlo (grafico inferior) en la resolución de un problema de optimización considerando tasas de mutación relativamente altas (10%). Se observa en ambos gráficos la alta diversidad de individuos, indicado por la variabilidad del promedio obtenido. Se observa también la inestabilidad del máximo en el grafico inferior en ausencia de elitismo.

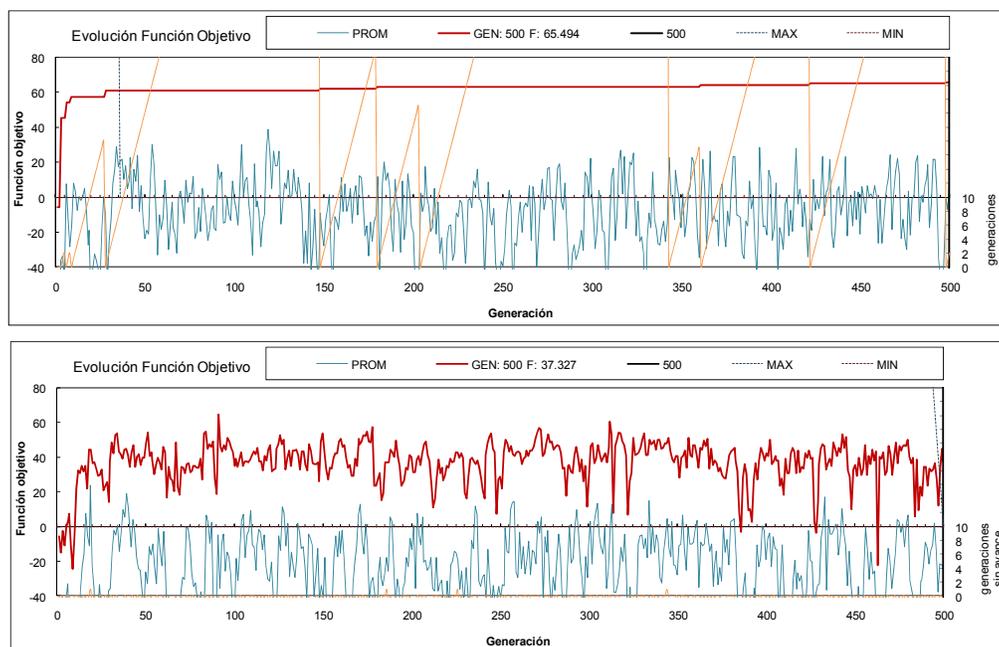


Figura 2.14 Influencia del elitismo con tasas de mutación relativamente altas (0.1) (superior con elitismo, inferior sin elitismo).

Crossover.

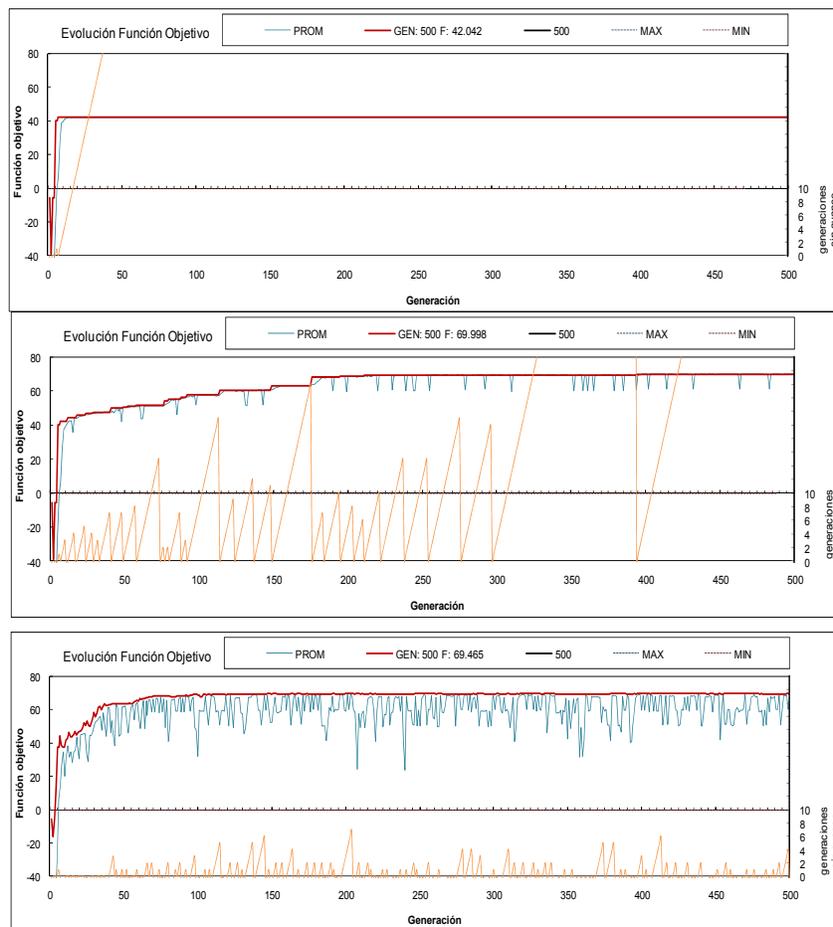
Es el mecanismo de herencia y combinación de las características codificadas, estas luego serán puestas a prueba en el medio ambiente. Es el principal proceso mediante el cual se va heredando y agrupando información a partir de piezas aisladas anteriormente. En general en algoritmos genéticos este proceso domina por sobre el de mutación, es un proceso constructivo y aleatorio, por sobre un proceso de

coincidencias. Para casos en que es impráctico contar con un gran número de individuos por generación, el proceso de mutación cobra relevancia (Rutkowski, 2008).

Existen diferentes modalidades de implementación del proceso de *crossover*. Entre las diferentes opciones posibles se encuentran: Puntual, Multipunto, Uniforme.

Mutación.

Este es el mecanismo de incorporación de aleatoriedad, generación de nueva información, es de importancia para el proceso evolutivo en poblaciones cerradas (sin ingreso de nuevo material genético) y de cantidad de individuos limitada. Esta situación se muestra en la Figura 2.15, se observa en la figura el efecto que tiene sobre la evolución de la función objetivo la incorporación de diferentes tasas de mutación. Los gráficos van desde la nula incorporación de tasas de mutación, pasando por un constructivo nivel de mutación hasta una situación destructiva de exagerada tasa de mutación. Se infiere entonces que existe un rango de tasas de mutación que producirá un efecto beneficioso sobre la evolución de la función objetivo.



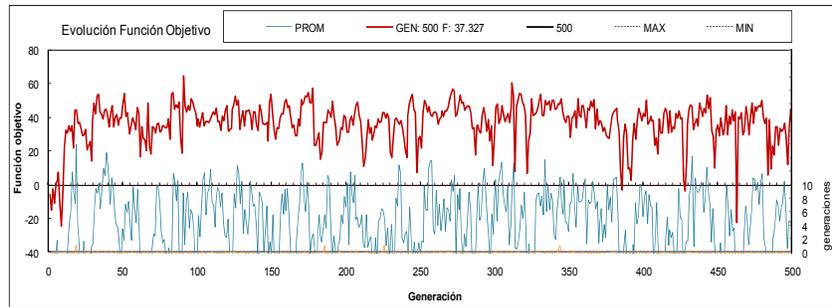


Figura 2.15 Influencia de la de mutación sobre la diversidad y convergencia (Prob. Mutación: nula, 0.001, 0.01, 0.1).

La implementación más sencilla de la mutación es la de cambio de valor de un alelo en una posición determinada. Existen otras opciones de implementación del proceso de mutación, tales como: Inversión de material genético entre 2 puntos, desordenamiento de los alelos entre 2 posiciones, inserción de material genético, intercambio entre dos posiciones, etc.

El proceso de reproducción, a través de la selección y el “*crossover*”, va homogenizando con el paso de las generaciones a los individuos de una población. La mutación es un mecanismo de inclusión de diferencias y eventual incorporación de información, generación de diversidad. Se puede controlar la diversidad genética cambiando la probabilidad de mutación durante el proceso evolutivo. Se observa en la Figura 2.15 los efectos sobre el máximo (individuo) y el promedio (población) de la función objetivo considerando diferentes tasas de mutación en un proceso sin elitismo, la influencia se muestra positiva dentro de un rango hasta destruir la información que se ha generado en etapas anteriores.

Técnica MicroGA.

Esta técnica, consiste en la aplicación de elitismo y la generación artificial (no proveniente de *crossover*) de material genético, cuando la diversidad genética se ha perdido producto de la evolución. La finalidad es inducir una probable mejora en la función objetivo al crear material genético aleatorio.

2.6.2.7 Construcción de una nueva población:

La selección original de individuos, la aplicación de operadores genéticos y la posterior aplicación de diferentes estrategias y protección de material genético o diversidad, conduce a la construcción de una nueva población. Esta población será evaluada, calculando nuevamente la aptitud o “*fitness*”, entrando nuevamente en el círculo evolutivo.

3. OPTIMIZACION - SIMULACIÓN

En este capítulo se describe las modificaciones e implementación del código necesario para realizar el proceso de optimización simulación.

Se ha adaptado un “*driver*” de algoritmos genéticos gratuito y disponible en *internet* (<http://www.cuaerospace.com/carroll/ga.html>). El código de este driver se encuentra disponible en FORTRAN77 y su funcionamiento se encuentra detallado en las notas aclaratorias incluidas dentro del código. Se realizó modificaciones para conseguir el ordenado registro de las acciones y el acoplamiento entre la optimización y la simulación. Entre las modificaciones principales se encuentran:

- Implementación de un registro de las acciones realizadas.
- Implementación del criterio de detención por tiempo y avance.
- Lectura inicial del archivo “ubic.inp” para configuración de las condiciones de modelación y verificación de parámetros.
- Implementación de paralelización del envío de individuos para la simulación y evaluación de resultados.
- Implementación de rutinas sincronizadoras de escritura y lectura.
- Escritura de archivos para comunicación de tareas hacia MOSSEM (config.dat).
- Lectura de archivos para interpretación de resultados de simulación.
- Implementación de modificación de límites superior de codificación para individuos.
- Registro del mejor caso.

El objetivo principal de las modificaciones realizadas ha sido lograr una simulación paralela de los individuos de cada generación. Para esto se ha implementado un sistema de comunicación de tareas y registro de acciones tomadas. También se ha resuelto la evaluación de los resultados y la verificación de criterios de detención.

3.1 ESQUEMA GENERAL DE COMUNICACIÓN

La manera mediante la cual se realiza la comunicación de los datos del proceso de optimización se encuentra retratada en la Figura 3.1, tiene dos grandes elementos, el computador donde se ejecuta GA y los computadores donde se realizan las simulaciones. En el computador “PC0”, donde se ejecuta GA, se encuentran las carpetas que serán accedidas mediante FTP por los computadores, simuladores. En estas carpetas GA dejará 2 archivos, “config.dat” y “ubic.inp” a este paso se le llamará “envío de casos”. Luego los computadores simuladores buscarán con cierta periodicidad los archivos config.dat desde sus carpetas asignadas y dependiendo de la información que en el archivo exista, se procederá a descargar la información y realizar la simulación correspondiente. Para lograr la continua comunicación de archivos se

ha implementado un programa llamado “cargadorMOSSEM” el cual ejecuta estas transferencias en cada computador de manera ordenada, además de realizar las llamadas a MOSSEM.

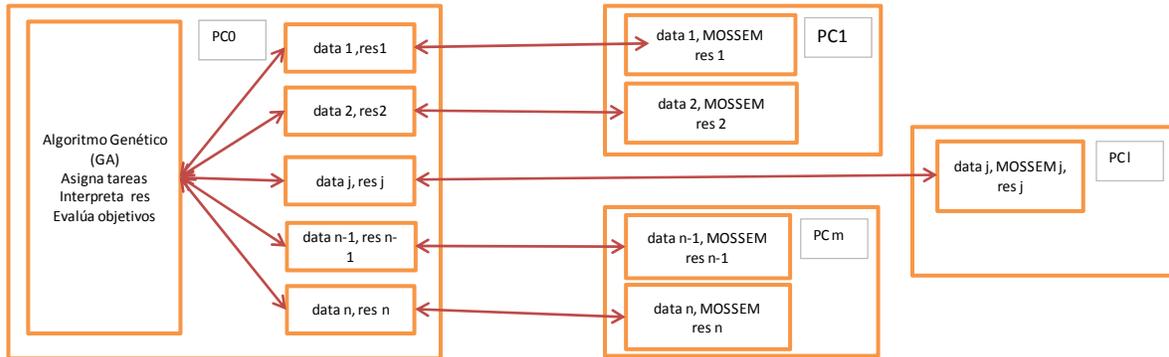


Figura 3.1 Esquema general de comunicaciones en el proceso Optimización - Simulación.

Luego de concluida alguna simulación (“proc. j”) en algún computador el programa cargadorMOSSEM comprimirá los archivos de resultados de acuerdo al estado de finalización de la simulación, los copiará via FTP hasta la carpeta en “PC0” correspondiente y luego esperará a leer nuevamente el archivo “config.dat”, donde viene la indicación de realizar una simulación o no.

Cada computador remoto, computador simulador, será cargado con una cantidad de procesos equivalente a su cantidad de núcleos.

3.2 DATOS DE ENTRADA

Se ha definido un formato de archivo común entre MOSSEM y GA, en este archivo se definen las principales características de las simulaciones a realizar y sus condiciones. el formato del archivo “ubic.inp” es la indicada en la Figura 3.2 y descrita a continuación.

1	168	5				
2	n	sec	tasa	tipo	zona	
3	1	11	0.00000	4	0	
4	2	24	0.00000	3	0	
5	3	70	0.00000	3	0	
6	4	71	0.00000	1	0	
7	5	75	0.48639	2	1	
8	6	76	0.48639	2	1	
9	7	77	0.48639	2	1	
10	8	78	0.48639	2	1	
11	9	79	0.48639	2	1	
12	10	80	0.48639	2	1	
13	11	81	0.48639	2	1	
14	12	82	0.48639	2	1	
15	13	83	0.48639	2	1	
16	14	84	0.48639	2	1	
17	15	85	0.48639	2	1	
18	16	86	0.48639	2	1	
19	17	87	0.48639	2	1	

Figura 3.2 “UBIC.INP” ejemplo de ingreso de información a MOSSEM.

En la primera línea se indica el número total de nodos a leer y el descenso máximo admisible en metros. Si en algún momento de la simulación se supera el descenso máximo admisible se detendrá la simulación y se informará la situación arrojando un archivo que indica de manera codificada la razón de la detención. La segunda línea del archivo es un texto en el cual se indican a que corresponden cada una de las columnas, a continuación se indica un número correlativo, el número de la sección del modelo en MOSSEM al cual corresponde, la tasa de extracción de esa sección, el tipo de nodo y la zona de extracción.

columna	Descripción
n	: Número correlativo.
sec	: Número de la sección de MOSSEM correspondiente, en orden ascendente
tasa	: Valor de extracción en [10 ⁶ ton/año]
tipo	: Entero que indica el tipo de actividad o infraestructura en la sección del modelo, representando la realidad del cauce: 1 : La sección representa un puente. 2 : La sección representa una zona de extracción de áridos. 3 : La sección representa una Bocatoma. 4 : La sección representa una zona de extracción de áridos no controlada, no optimizable.
Zona	: Número correlativo de zona de concesión al cual está asociada la sección del modelo. Sólo es distinto de 0 para los nodos tipo 2.

Tabla 3.1 "UBIC.INP" columnas de datos ingresados.

Este archivo debe estar definido antes de iniciar GA, puesto que en él se definen la cantidad de zonas de extracción y la ubicación de estas. GA al leer este archivo verifica la consistencia de los datos ingresados (GA.inp) y UBIC.inp, verificando que la cantidad de variables (zonas de extracción) sea la misma, que la cantidad de nodos indicada sea efectiva.

3.3 ARCHIVOS DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El programa “cargadorMOSSEM” dependiendo del estado de salida de una simulación, generará diferentes archivos. Así, por ejemplo, si la salida es exitosa, es decir, se han respetado los niveles de descenso y se ha realizado la simulación completa, se generarán los siguientes archivos:

Archivo		Descripción
termin.dat	:	Contiene un 1 en caso exitoso (inicialmente era un 0).
tiempo2.dat	:	Salida de MOSSEM, especial para esta aplicación, lista de tiempos en los cuales se ha realizado un reporte de acuerdo con lo especificado en el programa MOSSEM (interno), 24horas.
output2.dat	:	Salida especial de MOSSEM, para cada nodo y tiempo2 se reporta la Cota de Fondo [msnm] aparte de otras características del flujo, como velocidad, cota del pelo de agua y extracciones de áridos.
tiempo.dat	:	Original de MOSSEM.
output.dat	:	Salida de las variables calculadas de MOSSEM, espacial y temporalmente.

Tabla 3.2 Salidas en caso exitoso

Los resultados serán guardados localmente y se enviarán sólo los necesarios para la evaluación de objetivos por parte de GA. Estos archivos son “tiempo2.dat”, “output2.dat”, “ubic.inp” y además de “config.dat”, los archivos se comprimen y envían vía FTP al computador “PC0”, localmente se comprimen los archivo de salida para respaldo, el nombre del archivo de respaldo tiene la siguiente estructura: “G” + Ngen + “-J” + Nind + “.rar”. (Ngen es el número de generación y Nind el Número de individuo simulado),

En caso de que una simulación resulte ser mal ejecutada, MOSSEM entregará un archivo llamado “nodocaidareport.dat” en donde se indica el nodo de caída y el tiempo en que ocurrió. El archivo de resultados comprimido contendrá los archivos “tiempo2.dat”, “ubic.inp”, “config.dat” para establecer la duración de la simulación, localmente se comprimen los resultados en un archivo cuyo nombre presenta la estructura siguiente: “G” + Ngen + “-J” + Nind + “-m” + “.rar”.

4. CASO DE ESTUDIO, RÍO MAIPO

4.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo está estructurado de manera tal que se presenten en orden los elementos que conformarán la optimización-simulación realizada. Se destaca en este sentido que el modelo de simulación construido presenta limitaciones en sus alcances. Se construirá un modelo con la dinámica de sedimentos acelerada, modificando la curva granulométrica característica del sistema (haciéndola más fina), y las importantes extracciones de caudales que existen en el sistema serán obviadas por simplicidad, sin embargo se considerará la estructura espacial, de infraestructura y geométrica del sistema Maipo.

En 4.1 se realiza una descripción general del sistema y de la administración del río. En 4.2, se detalla la zona de estudio, sus límites y elementos, luego, en 4.3, se hace un análisis de la información de caudales a utilizar para las simulaciones numéricas. Teniendo en cuenta los antecedentes se construye un modelo de simulación en MOSSEM en 4.4, este será acoplado según a un algoritmo genético que resuelve el problema de optimización planteado en 4.5.



Existe un conjunto de causas que explican el nivel de explotación e intervención de los cauces de Chile central. Las características morfológicas de esta región de Chile son tales que permiten la generación y acumulación de áridos, de excelentes propiedades para la construcción y otros usos. El tamaño del mercado consumidor es tal que hace atractiva la industrialización de la actividad de extracción de áridos en la región. La cercanía de los cauces agrega otro elemento positivo para la formación de una industria. El bajo costo (directo) de transporte termina por generar una presión sobre los recursos naturales en general y sobre los áridos en particular. Es así como se configura un ambiente de explotación de áridos intensivo en Chile Central y por sobre todo en el principal río de la región metropolitana, el río Maipo.

Se presenta en la Figura 4.1 un mapa de la ubicación general, desde la escala nacional hasta la regional, de la zona en estudio así como los principales cauces afluentes al río Maipo en la zona alta de la cuenca. En la porción superior se distingue la zona urbana del Gran Santiago. Se muestra en la figura los principales afluentes al río Maipo en la zona del cajón del Maipo, así como los límites comunales de la división política administrativa, de interés para la industria del árido. Se han marcado también las extracciones puntuales (puntos amarillos) detectadas utilizando “*Google Earth*” y las zonas de extracción para efectos del estudio (zonas rojas).

La administración del río Maipo tiene la siguiente estructura en la región Metropolitana: Desde su nacimiento la gestión recae en la I. Municipalidad de San José de Maipo. Desde el sector de la quebrada “El Canelo”, comparte la responsabilidad con la I. Municipalidad de Pirque por la ribera izquierda (mirando hacia aguas abajo). En el sector del estero “Del Coipo” pasa a ser administrado por la I. Municipalidad de Puente Alto por la ribera derecha (mirando hacia aguas abajo) y la de Pirque por la ribera izquierda. En la confluencia del río Clarillo la administración cambia, siendo responsabilidad de las I. Municipalidades de San Bernardo por la derecha y la de Buín por la izquierda. Hacia aguas abajo, fuera del área de estudio, la gestión del río nuevamente se divide, quedando a cargo de la I. Municipalidad de Isla de Maipo por la derecha y la de Buín por la izquierda. Llegando al sector de Isla de Maipo, la ribera izquierda pasa a ser parte de la I. Municipalidad de Paine que aguas abajo pasa a pertenecer a la Municipalidad de Isla e Maipo. Antes de la confluencia con el río Mapocho la ribera norte (derecha) del río Maipo forma parte de la comuna de Talagante y posteriormente de la de “El Monte”.

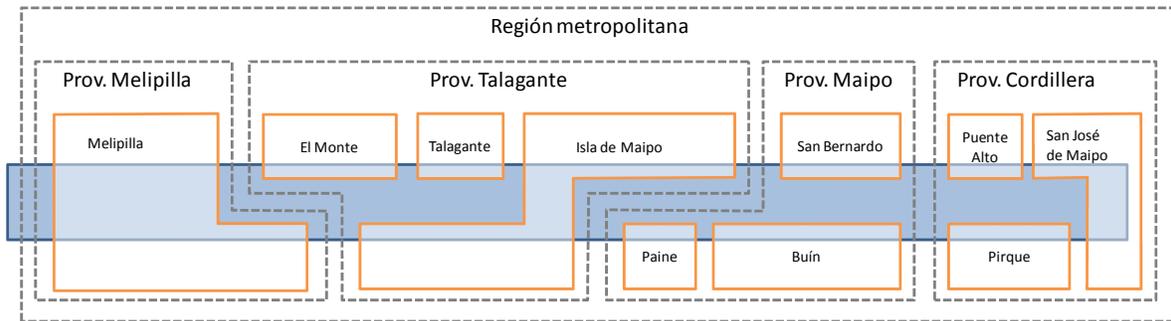


Figura 4.2 Esquema división político administrativa del río Maipo.

Se muestra en la Figura 4.2, el esquema de división político administrativo mostrando de manera sintética el gran desafío que significaría unificar los criterios de explotación de sus recursos. Se destaca que el río Maipo atraviesa 4 provincias de la región metropolitana.

Se ha abordado el problema de gestión de la explotación de los sedimentos (gruesos) que produce la cuenca alta del río Maipo en su zona más intensamente explotada (San José de Maipo hasta San Bernardo-Buín, específicamente desde la zona de la Obra hasta el cruce del puente ruta 5.

4.2 ZONA DE ESTUDIO

Se ha definido como zona de interés el tramo del río Maipo comprendido entre El manzano y el cruce del puente Ruta 5 Sur, esta zona cumple con los criterios de intensidad de explotación, información disponible y densidad de infraestructura. Se ha descartado la consideración del tramo San Alfonso El Manzano por las siguientes razones.

La actividad industrial en el tramo es despreciable.

No se encuentra Infraestructura importante a nivel regional, salvo el camino al volcán.

En la localidad de “El Manzano” existe una estación fluviométrica con registro satelital de datos en tiempo real.

Utilizando la herramienta “Google Earth” además de estudios del Ministerio de Obras Públicas disponibles, se ha realizado un catastro de las principales obras de infraestructura y zonas de extracción de áridos controladas y no controladas, ubicadas en la zona de estudio. A cada zona se le ha asignado un número de nodo, número que se relacionará más adelante con el modelo de simulación.

En orden longitudinal desde aguas arriba hacia aguas abajo se encuentra:



Bocatoma Canal "Pirque / Sirena".

Bocatoma Central hidroeléctrica "La Puntilla".

Nodo:2, (366850 E, 6283950 N)



Bocatoma Canal "San Carlos".

Bocatoma "Independiente".

Puente las vertientes.

Nodo: 3 y 4, (363550 E, 6282500 N)

Figura 4.3 Bocatomas mayores y puente las Vertientes.

La bocatoma del canal Pirque/Sirena, junto a la captación de aguas para la central hidroeléctrica "la puntilla. Hacia aguas abajo, en la zona denominada "La Obra" se encuentran las bocatomas más importantes de Maipo, las bocatomas del canal San Carlos y la bocatoma independiente de Aguas Andinas. Estas bocatomas presentan una considerable disminución de caudales y por lo tanto de capacidad de transporte de fondo, generando depósitos de sedimentos que son aprovechados por las empresas del rubro. Se aprecia el Puente las Vertientes a unos 110 metros aguas debajo de dichas bocatomas.



Zona de extracción 1

Nodos: 5 a 17, (362700 N, 6282000 E)



Bocatoma Canal "Eyzaguirre".

Nodo: 18, (362000 N, 6281950 E)

Figura 4.4 Primera zona de extracción de áridos y captación de caudales.

A partir del puente las vertientes se presenta una zona de extracción de áridos importante, ésta se produce justo cuando el río Maipo pierde parte de su caudal, la extensión asignada de esta zona de extracción es de 1300 metros. Aguas debajo de esta zona de extracción se encuentra la bocatoma del canal Eyzaguirre, el cual conduce sus aguas hacia "La Papelera" para luego regar de San Bernardo.



Zona de extracción 2

Nodos: 19 a 43, (362700 N, 6282000 E)



Bocatoma canal carburera

Nodo: 44, (357950 E, 6279370 N)

Figura 4.5 Segunda zona de extracción y bocatoma privada.

A continuación de la bocatoma Eyzaguirre se sucede una nueva zona de extracción de áridos, la cual en extensión presenta 2500 m. Luego se encuentra emplazada la bocatoma del canal “La Carburera”, la cual es una bocatoma industrial. En los nodos 45 y 46 se observa una explotación de áridos, la cual ha sido clasificada como “no controlada”, estas zonas no forman parte de las zonas de extracción.



Puente Concha y Toro

Nodos: 48, (353860 E, 6278110 N)



Zona de 3

Nodo: 49 a 76, (351740 N, 6276710 E)

Figura 4.6 Puente “Concha y Toro” y tercera zona de extracción.

En la comuna de “Puente Alto” la principal vía de comunicación entre esta comuna y Pirque, atraviesa el río Maipo en el puente “Concha y Toro” antiguo y nuevo, ambos con estructura de arco. Aguas abajo, se encuentra una extensa zona de explotación de áridos de 2800 metros de longitud, acotada hacia aguas abajo por criterios de cercanía a población.



Bocatoma “Asociación de Canalistas”
Nodos: 77, (348475 E, 6276060 N)



Zona de extracción 4
Nodo: 78 a 84, (346500 E, 6275400 N)

Figura 4.7 Bocatoma doble y cuarta zona de extracción.

En la confluencia del río Clarillo con el río Maipo se encuentra La bocatoma simultánea de los canales Huidobro por la izquierda (sur) mirando hacia aguas abajo y por el norte del canal común de la asociación de canalistas del Maipo, Aguas abajo de la confluencia comienza la cuarta zona de extracción considerada, con una longitud de 700 metros, se encuentra limitada por aguas abajo debido a la cercanía del puente “Los Morros” y por los nuevos puentes de la autopista concesionada acceso sur.



Puente Los Morros
Puente Acceso Sur

Nodos: 85 y 86 (345980 N, 6274960 E)



Zona de extracción 5
Nodos: 87 a 114 (343810 E, 6274150 N)

Figura 4.8 Puentes los morros y acceso sur y quinta zona de extracción.

Los viaductos correspondientes a la autopista acceso sur y el camino “los Morros” junto con obras de captación de aguas de los canales “Unidos de Buín” por el sur y por el norte del canal “Lo Arriaga” o canal “Lo Herrera”. Hacia aguas abajo se ha detectado una extensa zona de explotación, 2800 metros de longitud se le han asignado a esta zona, diferenciándola de otra inmediatamente aguas abajo. La diferenciación se produce por la existencia de cruces de torres de alta tensión y por la gran extensión que presenta, se ha considerado, para fines de gestión, que la extensión de una zona de extracción no debe superar los 3.0 km de longitud. La zona intermedia se ha clasificado como zona de extracciones no controlada. La sexta zona de extracción presenta 2400 metros de longitud.



Zona de extracción 6

Nodos: 122 a 137 (340940E, 6271950 N)



Puente de tren sobre el Maipo

Puente Maipo (antiguo y actual) ruta 5 sur

Nodos: 143 y 144 (340260 E, 6270860 N)

Figura 4.9 Sexta zona de extracción y puentes de tren y Ruta 5 Sur.

La sexta zona de extracción se extiende desde el límite poniente de la anterior zona de extracción hasta aguas arriba de los puentes de tren y los puentes antiguo y actual sobre el Maipo. A partir de esta zona, hacia aguas abajo se encuentra también una zona de explotación de áridos intensa, esto se debe a la cercanía de vías de calidad, así como la cercanía a fuentes de energía, petróleo y electricidad. Esta última zona de explotación considerada en el estudio tiene una longitud de 2400 metros. Entre los nodos 138 y 142 se encuentra una zona de extracciones que ha sido clasificada como no controlada.



Zona de extracción 7

Nodos: 145 a 168 (338900 E, 6270150 N)

Figura 4.10 Séptima zona de extracción aguas abajo del puente Maipo.

4.3 INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

El río Maipo es el más importante de la región metropolitana, afluentes de éste río son las aguas de toda la región metropolitana configurando una extensa red de drenaje. En la zona alta (ver Figura 4.11, Maipo en

el Manzano) presenta un régimen de escurrimiento nival, característico de los ríos de alta montaña. Se observan también ligeros aporte pluviales en invierno provenientes de zonas bajas de la cuencas. Al recibir más aportes de zonas bajas, cerca de su desembocadura al mar, el río Maipo cambia su régimen a nivo-pluvial. Este comportamiento es típico de los ríos de la zona central de Chile (Figura 4.11, Maipo en Cabimbao).

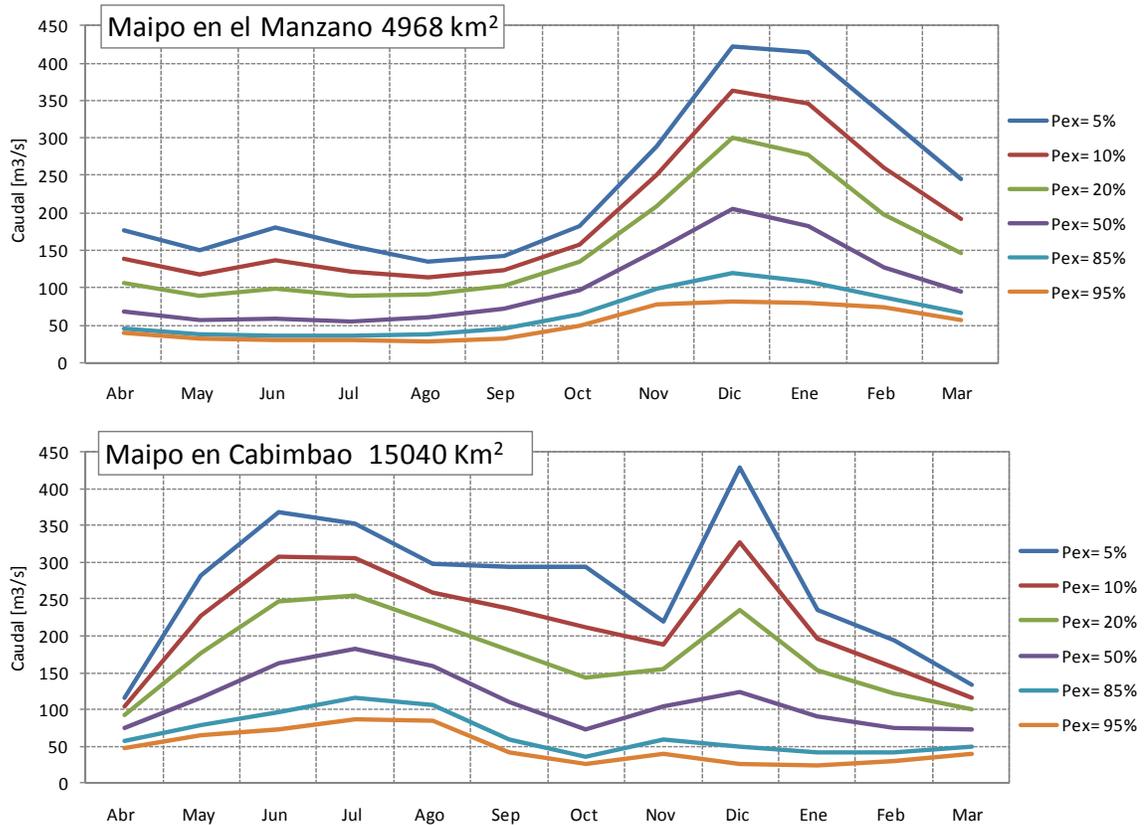


Figura 4.11 Curvas de variación estacional, Maipo en el Manzano y Maipo en Cabimbao

Los caudales en la zona de estudio se encuentran fuertemente intervenidos por las sucesivas extracciones de caudal a partir de la bocatoma del canal pirque/sirena. Sin embargo las crecidas estacionales se encuentran dominadas por los caudales medidos en la estación “Maipo en el Manzano”. Las extracciones de caudal que se encuentran a lo largo del sistema perturban el comportamiento del río, disminuyendo la capacidad de transporte de fondo, pero se ha observado que las tasas de transporte de sedimentos son no lineales respecto del caudal, lo cual indicaría que el mayor volumen de sedimento grueso se transportaría en condiciones de alto caudal, crecida estacional y eventos de precipitación. Así mismo las mayores

alteraciones del régimen de escurrimiento ocurren en período de estiaje, tal como se observa en la Figura 4.12.



Figura 4.12 Bocatoma San Carlos e Independiente (estiaje y crecida de verano)

En la Figura 4.12 se observa las diferencias que se producen de una época del año a otra (diciembre a marzo), producto de las diferencias de caudales y las extracciones de caudales. En la imagen superior se observa como la barrera de la bocatoma San Carlos (derechos permanentes y continuos por $45.87\text{ m}^3/\text{s}$) e independiente (derechos permanentes y continuo por $23.8\text{ m}^3/\text{s}$) funciona perfectamente, filtrando pequeña parte del caudal del río ($66.4\text{ m}^3/\text{s}$), esto produce la exposición del lecho del cauce hacia aguas debajo. En la imagen inferior se muestra la situación experimentada en época de crecida ($144\text{ m}^3/\text{s}$). No se considerarán las extracciones de caudales realizadas en el desarrollo del sistema, por simplicidad de modelación.

En la Figura 4.16 se destaca la ubicación de la estación fluviométrica mencionada, en la misma figura se observan los aportes puntuales al río Maipo son, desde aguas arriba hacia aguas abajo, los siguientes: estero “El Canelo”, quebrada “El Temple”, Estero “Del Coipo”, y finalmente el río Clarillo. Todos cauces de envergadura mucho menor a la del río Maipo. El mayor de estos aportes corresponde al río clarillo.

El área total aportante a la cuenca del río clarillo es de unos 237 km^2 , este cauce posee control fluviométrico pero es de mala calidad y poco confiable puesto que la estación se encuentra influenciada

por el eje hidráulico del río Maipo y por las obras de captación de los canales cercanos (Dirección General de aguas, 2003). La cuenca del río clarillo representa menos del 5% del área aportante hasta Maipo en El Manzano (237km^2 v/s 4968km^2), razón por la que no será considerado su caudal aportante. La serie de caudales horarios utilizada para la simulación del modelo numérico ha sido extraída de la serie histórica medida en la estación fluviométrica Maipo en el Manzano.

Nombre	Código BNA	Cuenca	Sub Cuenca	
RIO MAIPO EN EL MANZANO	05710001-K	Rio Maipo	Rio Maipo Medio	
		Ubicación		Altitud
		UTM Norte [m]	UTM Este [m]	[msnm]
		6281962	372023	850
				Área de drenaje
				[km ²]
				4968

Tabla 4.1 Estación Maipo en el Manzano, datos de la estación.

Disponiendo de datos en tiempo real satelital (www.dga.cl) que se remontan hasta el año 2000, se ha acotado a un año, para evitar tiempos de simulación demasiado largos. La serie está compuesta por los datos extraídos entre los días primero de octubre del año 1999 hasta el día 29 de septiembre del año siguiente y rellenada en los períodos de tiempo en que falta información. Para el relleno de datos horarios se ha utilizado la técnica más sencilla, la interpolación lineal. En la Figura 4.13 se muestran los datos de manera gráfica junto con la estación del año a la que corresponden.

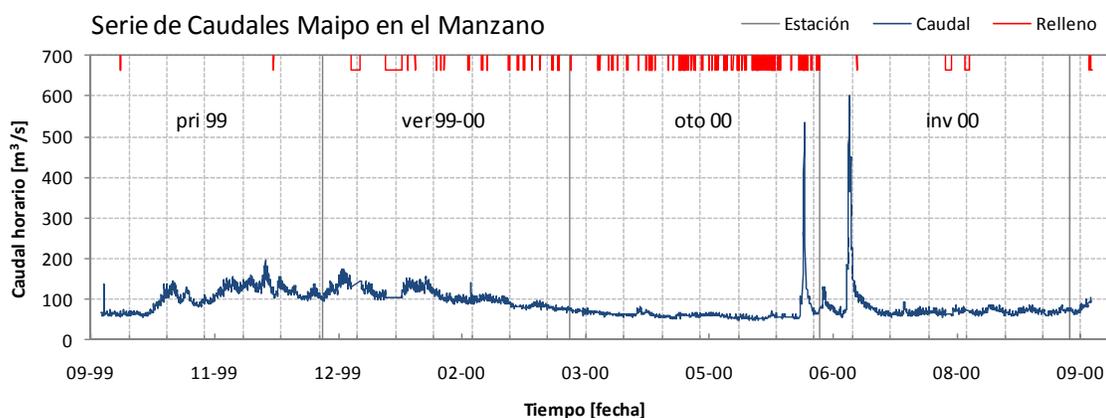


Figura 4.13 Serie de caudales horarios seleccionada

Se observa en la Figura 4.13 que la serie de caudales presenta el comportamiento normal del río Maipo, una larga crecida estacional de verano producto del derretimiento y eventuales tormentas cordilleranas estivales y eventos singulares de crecida en invierno producto de las precipitaciones registradas al paso de sistemas frontales. Sobre la crecida de verano se menciona que esta se extiende, en general, desde principios de octubre hasta febrero, originando que los meses de estiaje sean los de marzo y abril. En una escala horaria se presentan variaciones importantes en los caudales, la gran amplitud térmica registrada en verano explica mayormente este comportamiento..



Figura 4.14 Variación horaria de caudales, extracto de la serie de caudales horarios seleccionada

Se ilustra en la Figura 4.14 las variaciones experimentadas durante parte del mes de noviembre y diciembre del año 1999. Estas variaciones superaron los 60 m³/s, debiéndose, probablemente, al efecto conjunto de tormentas estivales y derretimiento.

Este comportamiento agrega complejidad al sistema y por esta razón es que se ha optado por la simulación a escala horaria en vez de una simulación numérica con caudales medios diarios.

Finalmente se comenta que en términos de un análisis de frecuencia (ver Figura 4.15), se ha verificado que los máximos de la serie temporal, se encuentran en un rango normal de variación, entre 2 y 10 años como período de retorno. La crecida invernal (pluvial) es la de menor probabilidad de excedencia y mayor caudal.

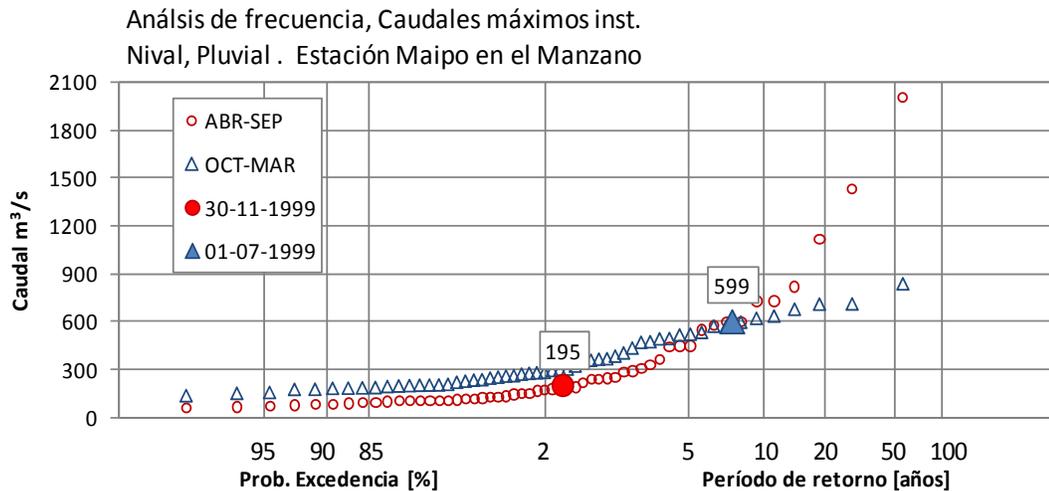


Figura 4.15 Análisis de frecuencia, caudales máximos instantáneos, Maipo en el Manzano

4.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Utilizando información del Gobierno regional, se construyó un modelo topo-batimétrico del río Maipo en la zona de estudio, este trabajo ha sido realizado por Cristián Godoy alumno del programa de doctorado en Fluidodinámica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile.

Inicialmente se tuvo considerado como zona de estudio desde la localidad de San Alfonso hasta el cruce del puente ruta 5, y se tenía contemplados 37 puntos de interés, en los cuales se trazó perfiles transversales, con el objetivo de extraer información topográfica. Finalmente se abandonó el tramo entre san Alfonso y el Manzano, quedando en el modelo definitivo 29 de los perfiles transversales originalmente trazados. Estos perfiles luego fueron procesados de manera de adaptarlos a la geometría trapecial requerida por el software de simulación MOSSEM. Hubo que extrapolar la geometría de la batimetría, pues no se cuenta con esta información.



Figura 4.16 Zona de estudio, ubicación de perfiles generadores.

Se muestra en la Figura 4.16, la ubicación de los perfiles utilizados junto con las zonas de extracción (concesión) definidas en el estudio presente, además de la estación fluviométrica utilizada. Los perfiles dan cuenta de la variación espacial y singularidades del cauce del río Maipo.

Debido a problemas de estabilidad numérica en el modelo de simulación, se requirió aumentar el número de perfiles transversales, interpolándose perfiles para lograr un espaciamiento aproximado de 100 m. Los 29 perfiles transversales originales dan cuenta de los cambios y singularidades más importantes que ocurren en el cauce del río Maipo en la zona de estudio. El modelo de simulación final cuenta con 408 perfiles transversales a lo largo del cauce.

Luego de obtenida la configuración geométrica del modelo de simulación, debe calcularse el eje hidráulico inicial del modelo. Para esto se debe realizar una simulación del sistema sin considerar transporte de sedimentos, ejecutar MOSSEM sin transporte de sedimentos.

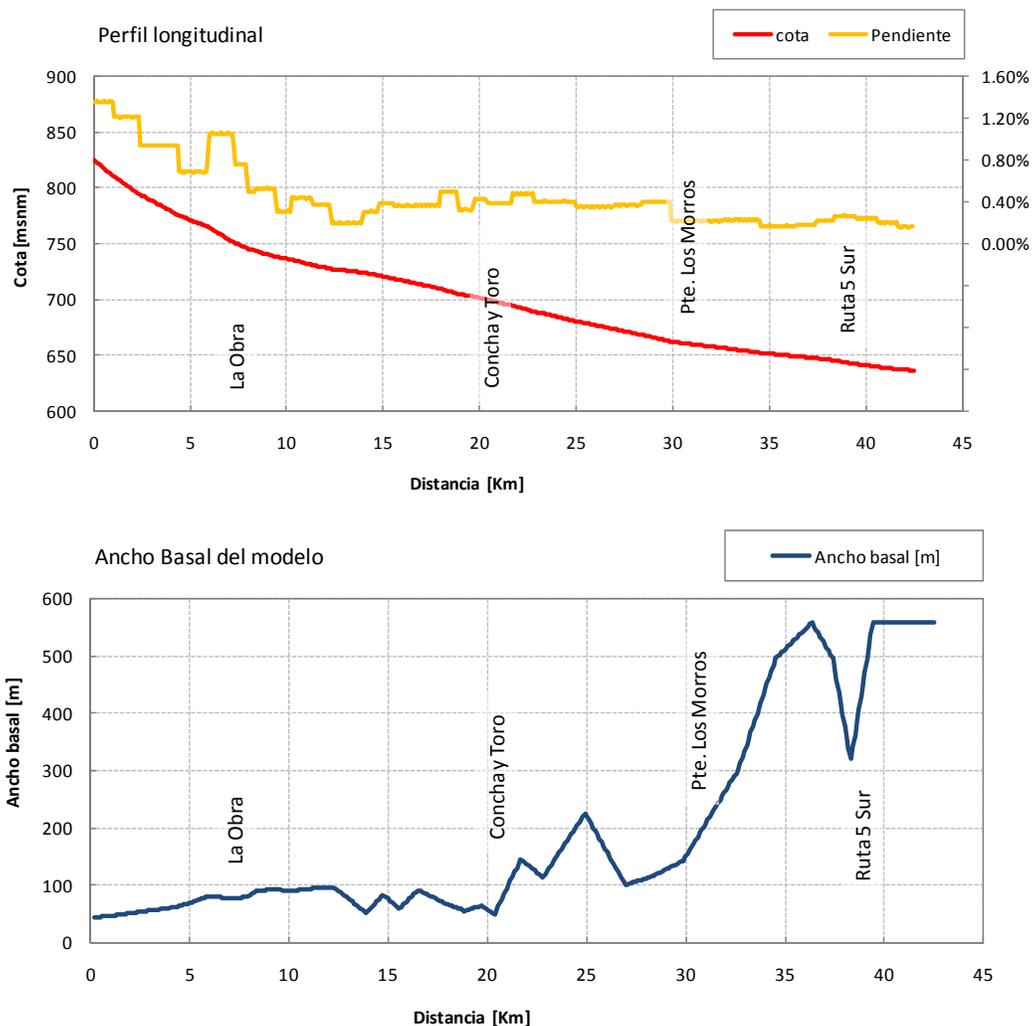


Figura 4.17 Perfil longitudinal y ancho basal del modelo de simulación.

A manera de resumen se muestra en la Figura 4.17 el desarrollo longitudinal de la cota de fondo y la pendiente longitudinal (grafico superior) indicando algunos hitos geográficos. En el gráfico inferior se muestra el ancho basal del modelo de simulación.

Se observa en la Figura 4.17 la variación geométrica del modelo a lo largo del desarrollo longitudinal. Las altas pendientes observadas desde el inicio del modelo, hasta el sector de “La Obra” se suceden de bajas pendientes en el sector del puente “Concha y Toro” hasta el puente los morros. Las pendientes de la parte inferior del modelo se reducen aún más, quedando en alrededor de un 0.4%. Por otro lado, el ancho basal del cauce varía desde 45 metros en la zona superior del modelo hasta 100 metros en el sector de “La Obra”. Luego se manifiesta un aumento drástico a partir del puente “Los Morros”, pasando desde 100 metros hasta una caja de 560 metros de ancho. Se observa una disminución abrupta en el ancho natural del río en el sector del cruce de la Ruta 5 Sur, situación que se explica precisamente por las obras efectuadas para disminuir las luces a cubrir por los puentes.

Finalmente se presenta en la Figura 4.18 el resumen de la información del catastro y del modelo de simulación

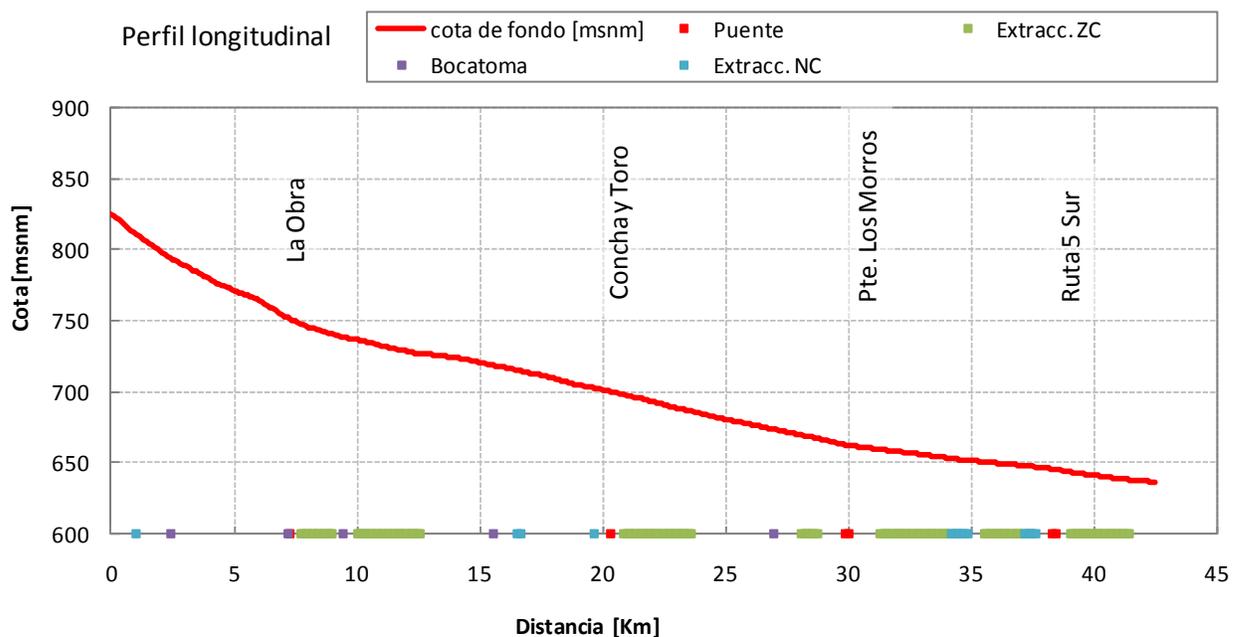


Figura 4.18 Perfil Longitudinal e información del catastro.

Para evaluar el transporte de sedimentos, se ha utilizado la metodología de “Wilcock y Crowe”.

4.4.1 Curva granulométrica

Es cierto que no es posible caracterizar la compleja dinámica del sistema mediante una única curva granulométrica pues, en sistemas naturales se observa una variación al menos longitudinal y vertical de la composición del lecho. Sin embargo se requiere dar cuenta de la dinámica general de un sistema complejo

y para esto se ha adaptado una curva granulométrica original del sistema Maipo. La adaptación consiste en un refinamiento de los granos. De acuerdo a lo que se muestra en la Figura 4.19.

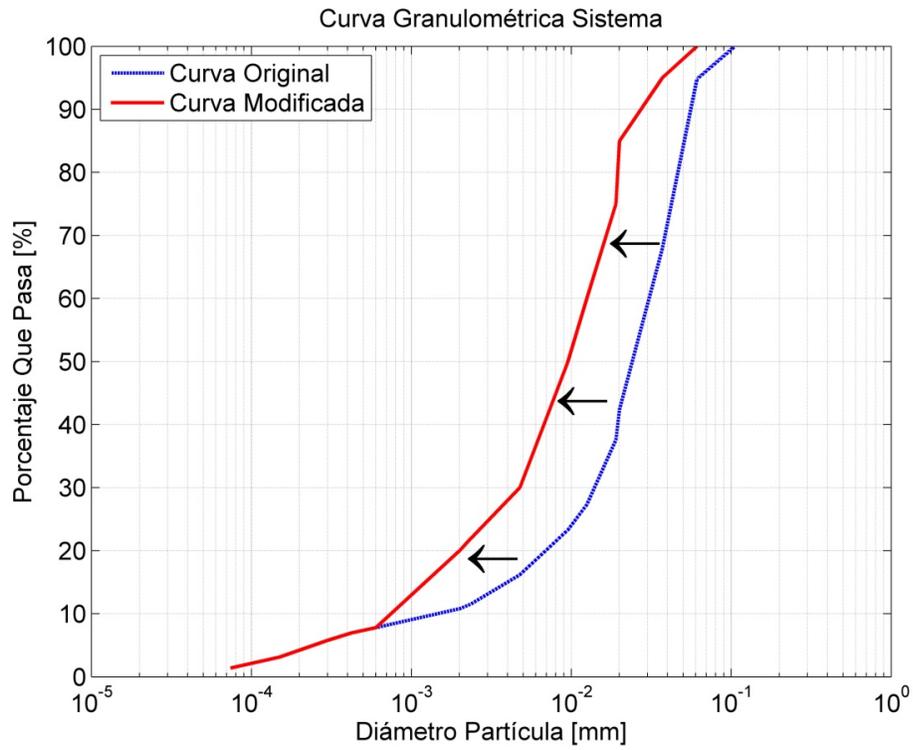


Figura 4.19 Curva granulométrica y su modificación.

4.5 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

4.5.1 Introducción

A continuación se definirá el problema de optimización conceptual en 4.5.2, luego matemático en 0. Para la resolución del problema de optimización planteado se ha utilizado un algoritmo genético lo cual se requirió implementar una forma de acoplamiento con el modelo de simulación.

4.5.2 Formulación conceptual.

Se plantea contestar la siguiente pregunta, ¿Cuál es el esquema de producción de áridos óptimo de manera tal de no superar un descenso máximo admisible dado? En respuesta a esta pregunta se plantea un problema de optimización de la siguiente manera:

El esquema productivo dice relación con los tonelajes extraídos desde cada zona de explotación.

Elemento	Descripción
Objetivo:	Maximizar la producción total de áridos del sistema, tasas de extracción por la longitud de cada zona.
	Se monitoreará el descenso de los puntos de interés, puentes y bocatomas.
VARIABLES DE DECISIÓN:	Las tasas de extracción por unidad de longitud en cada zona de extracción.
VARIABLES DE ESTADO:	El descenso simulado en cada punto y tiempo del modelo numérico.
Restricción explícita:	El descenso no debe ser mayor que un valor predefinido. Las tasas de extracción son menores al límite impuesto por GA.
Restricciones implícitas:	Ecuaciones de Sain-Venant del flujo, Ecuaciones de transporte de sedimentos (modelo de simulación numérico).

Para este modelo de simulación numérica de 408 perfiles y un procesador QuadCore de 2.44GHz, cada simulación avanza 1 año por cada hora de cómputo, pudiendo realizar a lo más 4 simulaciones en paralelo. Considerando lo anterior, se resolverá el problema de optimización para un tiempo de simulación de un año.

En concordancia con los antecedentes expuestos en las etapas anteriores, se presenta un esquema que resume los elementos a considerar en la formulación del problema de optimización.

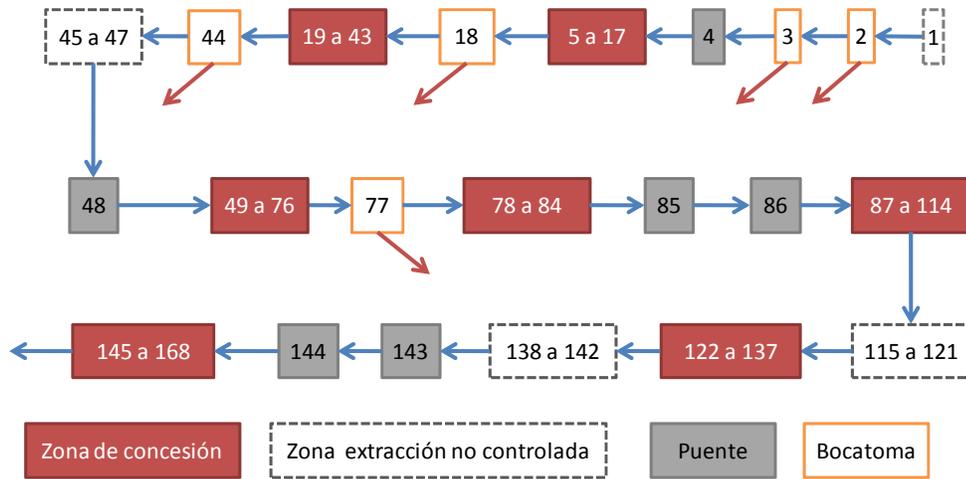


Figura 4.20 Esquema de extracciones e infraestructura existente en el Río Maipo

El número dentro de cada rectángulo indicado en la Figura 4.20 corresponde a un nodo de gestión en donde se ha definido la sección del modelo de simulación que representan, la naturaleza del nodo, las tasas de extracción correspondientes y la zona de extracción a la cual pertenece. Esta información y otra se encuentra especificada en un archivo de entrada llamado “ubic.inp” detallado más adelante.

4.5.3 Formulación matemática.

Se requiere establecer una formulación matemática y su consiguiente programación dentro del algoritmo genético para dejar claras las consideraciones realizadas y los elementos considerados.

De manera general el problema de optimización se ve de la siguiente manera:

$$MAX \quad \sum_{zc=1}^7 l_{zc} \cdot M_{zc} = \sum_{i=1}^n d_{i,2} \cdot tasa(i) \quad 4-1$$

Donde :

l_{zc}	Es una medida de la longitud de la zona de extracción zc , es equivalente a un intervalo entre secciones del modelo de simulación.
M_{zc}	Es el tonelaje total anual extraído por cada intervalo en la zona de extracción zc , positivo en cualquier caso. Esta extracción tiene carácter continuo en el tiempo.

Cada nodo i , de gestión, tiene sus propiedades asociadas: $sección(i)$, $tipo(i)$, $tasa(i)$, $zona(i)$.

Además de este objetivo se ha monitoreado las siguientes cantidades:

$$\sum_{i=1}^n d_{i,k} \cdot \sum_{m=1}^T H(D_{i,m} - dl_k)$$

4-2

Donde:

$d_{i,k}$	Es una delta que indica si el nodo i se trata de un nodo tipo k , es decir: $d_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{si } tipo(i) = k \\ 0 & \text{si } tipo(i) \neq k \end{cases}$
$D_{i,m}$	Es el valor de descenso máximo del nodo i en el período de evaluación m de un total de T períodos. t es el tiempo en la simulación, m el número de período y $peri$ la duración de cada período. $D_{i,m} = \max_t(\eta_{i,0} - \eta_i(t)), t \in [peri \cdot (m - 1), peri \cdot m]$
$H(D_{i,m} - dl_k)$	Es una función Heaviside desplazada en dl_k que representa un límite de sensibilidad mínimo dependiente del tipo de obra asociada.

Esta evaluación se realiza para los nodos de tipo “Bocatoma” y “Puente”, el valor límite de dl_k se ha fijado en 0.5 m para todo tipo de estructuras. Finalmente se ha dividido el valor obtenido por la cantidad de nodos correspondientes al tipo de obra, obteniéndose el tiempo promedio que pasan los nodos, de un tipo u otro, sometidos a descensos por sobre dl_k .

La restricción de descenso máximo admisible es explícita y se ha incluido dentro de la simulación numérica (MOSSEM), logrando así detener la simulación al sobrepasar el límite de descenso predefinido, informando el nodo y tiempo en los cuales ha ocurrido tal condición.

$$\eta_{i,0} - \eta_i(t) \leq N, \forall i, t$$

4-3

Donde:

$\eta_{i,0}$	Es la cota de fondo inicial del punto i del modelo de simulación.
$\eta_i(t)$	Es la cota de fondo del punto i del modelo de simulación al tiempo t de simulación.
N	Es el descenso máximo admitido, 5 metros para esta aplicación.

Otra restricción que ha sido incorporada es la que limita las tasas de extracción. Esta restricción se debe a que los algoritmos genéticos tradicionales requieren de límites preestablecidos para ejecutarse. Todo el espacio de búsqueda debe poder ser codificado requiriéndose de límites claros.

$$M_{zc} \leq M_{gen}^{e\max}$$

4-4

Donde:

M_{zc}	Es la tasa de extracción anual en la zona zc del modelo de simulación.
$M_{gen}^{e\max}$	Es el máximo posible para la tasa de extracción en la generación gen .

Esta restricción será modificada en el proceso de evolución dependiendo de la relación que exista entre el individuo de máximo desempeño y el límite preestablecido, además de otras consideraciones como la de no avance y de factibilidad del individuo.

Las restricciones que relacionan las variables de decisión con las de estado se escriben, de manera general, de la siguiente manera:

$$\bar{\eta}(t) = \bar{g}(M_i, t)$$

4-5

Donde:

$\bar{\eta}(t)$	Es el vector de cotas de fondo de todos los puntos del modelo de simulación al tiempo t .
$\bar{g}(M_i, t)$	Representa, de manera compacta, la relación entre la geometría (dinámica), caudales, granulometría y extracciones realizadas con la cota de fondo de los puntos del modelo.

Establecer de manera explícita la forma funcional de esta relación es impráctico pues, en ella se encuentran las ecuaciones de Saint-Venant (continuidad y momentum del flujo), la modelación del transporte de sedimentos, la ecuación de continuidad de sólidos. Todas las ecuaciones mencionadas dependen del tiempo y espacio, requiriéndose de gran capacidad computacional para resolverlas.

Se comenta respecto de esta restricción que, si bien es cierto, es posible desagregar el esquema numérico, para formular un problema de optimización matemática estructurado, es impráctico. En cada paso de tiempo (segundos) se debiese escribir todas las ecuaciones de continuidad y momentum para cada uno de los puntos del modelo (408) hasta completar el tiempo total de simulación (años, millones de segundos).

4.5.4 **Evaluación implementada.**

Dentro del driver de algoritmo genético se ha implementado la generación de casos, envío de información hacia la herramienta de simulación, la recepción de información desde las simulaciones, la posterior evaluación de los objetivos principal y secundarios, la penalización de casos infactibles.

Se ha utilizado un archivo de texto, “ubic.inp”, como forma de transferencia de información desde el algoritmo genético hacia la simulación. En este archivo se detallan las características principales de la simulación y los nodos que participan tanto de la simulación como de la gestión. El archivo de configuración inicial “ubic.inp” del modelo de gestión se muestra en la Tabla 4.2.

Por su parte la simulación envía información en los archivos de salida (tiempo2.dat y outpu2.dat), así como la información acerca del término de la simulación (config.dat).

En primera instancia se deberá conocer el status de término de la simulación, es decir en que condición se finalizó la simulación (simulación completa, simulación terminada por descenso máximo alcanzado o simulación numéricamente inestable), para luego evaluar la aptitud de cada individuo (conjunto de tasas de extracción). La condición de salida de las simulaciones se conoce a partir del archivo config.dat.

```
! Lectura de archivos config y almacenar en vector ntermin(i)
DO np=1,nproc
  Call LECT(kgen,nworker(np),nescr,nini,nter,np)
  ntermin(np)=nter
ENDDO
-----
SUBROUTINE LECT(nngen,nind,nescr,nini,nter,np)
  Call waittill()
  OPEN (UNIT= 11, FILE=c(np)//'\cfg.dat', STATUS='unknown',SHARE='denynone')
  READ(11,'(i3,i3,i3,i3,i3)') nau1,nau2,nau3,nini,nter
  CLOSE(11)
  RETURN
END SUBROUTINE LECT
```

Recordando la sección 2.6.2.3 (página 31) se hace la diferencia entre la función objetivo del problema inicial restringido y la función de aptitud o “*fitness*” utilizada en algoritmos genéticos.

La función “*fitness*” dentro del algoritmo genético contiene bifurcaciones que se explican como consecuencia de los diferentes estados de finalización de la simulación de un individuo. Las posibilidades son: Simulación exitosa, simulación terminada por alcance del descenso máximo, simulación terminada por inestabilidad numérica.

Habiéndose simulado correctamente un caso, se procederá a la evaluación del objetivo principal y de los descensos en punto de interés, para esto se debe leer la información generada por MOSSEM en cada simulación. Se ha implementado una salida especial, reducida, en cuanto a la cantidad de variables y la frecuencia de muestreo de estas. Las variables muestreadas son las siguientes: cota de fondo, cota del pelo de agua, velocidad media del flujo y tasa de extracciones de áridos. Esto con la finalidad de poder incorporar futuras mejoras sin tener que cambiar MOSSEM.

Para los casos en que la simulación no es exitosa se ha implementado una técnica de penalización de la función objetivo, considerándose mejores los casos que haya alcanzado a simular mayor cantidad de tiempo, siempre un caso exitoso se considerará mejor que uno no exitoso.

```
if(ntermin(np).eq.1) then
  cop=systemqq('copy '//c(np)//'\output2.rar output2.rar /y')
  des=systemqq('rar e -o+ -inul output2.rar')
  call func(nworker(np),obj1,obj2,obj3,obj4)
  fitness(nworker(np),1)=obj1
  fitness(nworker(np),2)=obj2
  fitness(nworker(np),3)=obj3
```

```

        fitness(nworker(np),4)=obj4

elseif(ntermin(np).eq.2) then
    cop=systemqq('copy '//c(np)//'\output2.rar output2.rar /y')
    des=systemqq('rar e -o+ -inul output2.rar')
    call leetiempo(nss)
    fitness(nworker(np),1)=-10.0+1.0*nss/31449600.0
    fitness(nworker(np),2)=0
    fitness(nworker(np),3)=0
    fitness(nworker(np),4)=0

elseif(ntermin(np).eq.3) then
    cop=systemqq('copy '//c(np)//'\output2.rar output2.rar /y')
    des=systemqq('rar e -o+ -inul output2.rar')
    call leetiempo(nss)
    fitness(nworker(np),1)=-10.0+1.0*nss/31449600.0
    fitness(nworker(np),2)=0
    fitness(nworker(np),3)=0
    fitness(nworker(np),4)=0

```

Debido a que se desconoce de ante mano los límites de la búsqueda, se ha implementado la modificación incremental de los límites de las tasas de extracción según desempeño. Se requiere de esta modificación para lidiar con el hecho de que los algoritmos genéticos tradicionales trabajan sobre la base de un espacio finito de búsqueda.

Luego de realizar la evaluación de la población se ha incluido la modificación de los límites de búsqueda, realizando una evaluación de la cercanía del mejor individuo respecto del límite superior. Las condiciones que gatillan la actualización de los límites son las siguientes: cantidad de generaciones sin avance, localización de los parámetros del mejor individuo en el espacio de búsqueda y calidad del individuo (factible o no).

```

IF(kfit.ge.4) THEN
    cerca=0
    DO n=1,nparam
        if((parent(n,jbest)).ge.(0.85*parmax(n))) cerca=1
    ENDDO
    IF(cerca.eq.1.and.fitness(jbest,1).ge.0) then
        fesc=2.0
        fmga=1
        kfit=0
        DO n=1,nparam
            parmax(n)=fesc*parmax(n)
            pardel(n)=parmax(n)-parmin(n)
            g1(n)=pardel(n)/dble(nposibl(n)-1)
            DO i=1,npopsiz
                call code(i,n,parent,iparent)
            ENDDO
        ENDDO
    ENDDO
ENDIF
DO k=1,nchrome
    ibest(k)=iparent(k,jbest)
ENDDO
ENDIF

```

Considerando que:

- Cada simulación demora alrededor de 60 minutos por año de simulación para el modelo de simulación creado (408 perfiles, 42 km) en un procesador QUADCORE 2.44 Ghz, pudiéndose ejecutar 4 simulaciones en paralelo.
- Se cuenta con 3 computadores, 2 QUADCORE y un DUALCORE, 10 nodos de proceso en total.

El algoritmo genético se ha ejecutado utilizando:

- Generaciones de 10 individuos, uno por nodo de proceso.
- Elitismo.
- La técnica microGA.
- Un criterio de detención del proceso luego de 20 generaciones sin avance.

La simulación considera:

- Un descenso máximo de 5 metros en cualquier nodo y tiempo.
- Un período de simulación de 1 año.

El archivo de entrada correspondiente al modelo implementado se detalla en la Tabla 4.2

168	5																			
n	sec	tasa	tipo	zona	n	sec	tasa	tipo	zona	n	sec	tasa	tipo	zona	n	sec	tasa	tipo	zona	
1	11	0	4	0	43	120	0	2	2	85	286	0	1	0	127	346	0	2	6	
2	24	0	3	0	44	148	0	3	0	86	287	0	1	0	128	347	0	2	6	
3	70	0	3	0	45	157	0	4	0	87	300	0	2	5	129	348	0	2	6	
4	71	0	1	0	46	158	0	4	0	88	301	0	2	5	130	349	0	2	6	
5	75	0	2	1	47	187	0	4	0	89	302	0	2	5	131	350	0	2	6	
6	76	0	2	1	48	193	0	1	0	90	303	0	2	5	132	351	0	2	6	
7	77	0	2	1	49	198	0	2	3	91	304	0	2	5	133	352	0	2	6	
8	78	0	2	1	50	199	0	2	3	92	305	0	2	5	134	353	0	2	6	
9	79	0	2	1	51	200	0	2	3	93	306	0	2	5	135	354	0	2	6	
10	80	0	2	1	52	201	0	2	3	94	307	0	2	5	136	355	0	2	6	
11	81	0	2	1	53	202	0	2	3	95	308	0	2	5	137	356	0	2	6	
12	82	0	2	1	54	203	0	2	3	96	309	0	2	5	138	357	0	4	0	
13	83	0	2	1	55	204	0	2	3	97	310	0	2	5	139	358	0	4	0	
14	84	0	2	1	56	205	0	2	3	98	311	0	2	5	140	359	0	4	0	
15	85	0	2	1	57	206	0	2	3	99	312	0	2	5	141	360	0	4	0	
16	86	0	2	1	58	207	0	2	3	100	313	0	2	5	142	361	0	4	0	
17	87	0	2	1	59	208	0	2	3	101	314	0	2	5	143	368	0	1	0	
18	91	0	3	0	60	209	0	2	3	102	315	0	2	5	144	369	0	1	0	
19	96	0	2	2	61	210	0	2	3	103	316	0	2	5	145	375	0	2	7	
20	97	0	2	2	62	211	0	2	3	104	317	0	2	5	146	376	0	2	7	
21	98	0	2	2	63	212	0	2	3	105	318	0	2	5	147	377	0	2	7	
22	99	0	2	2	64	213	0	2	3	106	319	0	2	5	148	378	0	2	7	
23	100	0	2	2	65	214	0	2	3	107	320	0	2	5	149	379	0	2	7	
24	101	0	2	2	66	215	0	2	3	108	321	0	2	5	150	380	0	2	7	
25	102	0	2	2	67	216	0	2	3	109	322	0	2	5	151	381	0	2	7	
26	103	0	2	2	68	217	0	2	3	110	323	0	2	5	152	382	0	2	7	
27	104	0	2	2	69	218	0	2	3	111	324	0	2	5	153	383	0	2	7	
28	105	0	2	2	70	219	0	2	3	112	325	0	2	5	154	384	0	2	7	
29	106	0	2	2	71	220	0	2	3	113	326	0	2	5	155	385	0	2	7	
30	107	0	2	2	72	221	0	2	3	114	327	0	2	5	156	386	0	2	7	
31	108	0	2	2	73	222	0	2	3	115	328	0	4	0	157	387	0	2	7	
32	109	0	2	2	74	223	0	2	3	116	329	0	4	0	158	388	0	2	7	
33	110	0	2	2	75	224	0	2	3	117	330	0	4	0	159	389	0	2	7	
34	111	0	2	2	76	225	0	2	3	118	331	0	4	0	160	390	0	2	7	
35	112	0	2	2	77	258	0	3	0	119	332	0	4	0	161	391	0	2	7	
36	113	0	2	2	78	269	0	2	4	120	333	0	4	0	162	392	0	2	7	
37	114	0	2	2	79	270	0	2	4	121	334	0	4	0	163	393	0	2	7	
38	115	0	2	2	80	271	0	2	4	122	341	0	2	6	164	394	0	2	7	
39	116	0	2	2	81	272	0	2	4	123	342	0	2	6	165	395	0	2	7	
40	117	0	2	2	82	273	0	2	4	124	343	0	2	6	166	396	0	2	7	
41	118	0	2	2	83	274	0	2	4	125	344	0	2	6	167	397	0	2	7	
42	119	0	2	2	84	275	0	2	4	126	345	0	2	6	168	398	0	2	7	

Tabla 4.2 Información de entrada para el Caso de aplicación (“Ubic.inp”).

5. RESULTADOS

5.1 PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO EJECUTADO.

La optimización de las tasas de extracción se realizó considerando las siguientes condiciones:

Parámetro	Valor
Cantidad de generaciones máxima	200
# individuos por Población	10
Máximo de generaciones sin avance	20
Parámetros	7
Máximo inicial de los parámetros	0.1
Mínimo valor de los parámetros	0.0
Nivel máximo de descenso	5.0 m.

Parámetro	Valor
Técnica migroGA	SI
Elitismo	SI
“Tournament selection”	SI
Duración de un período	2419200 s
Precisión	15 bits

Tabla 5.1 Parámetros generales del algoritmo genético ejecutado

5.2 TIEMPO DE EJECUCIÓN

El proceso de adaptación se ha detenido por la activación del criterio de detención de 20 generaciones sin avance en la función objetivo. Se obtuvo 137 generaciones ejecutadas.

La búsqueda del óptimo realizó la evaluación de 137 generaciones, una generación sin contratiempos tomó aproximadamente 60 minutos en ejecutarse. Se registraron 3 interrupciones durante el proceso según se observa en la Figura 5.1, las interrupciones han sido causales y se han debido desconexión manual de los equipos de cómputo.

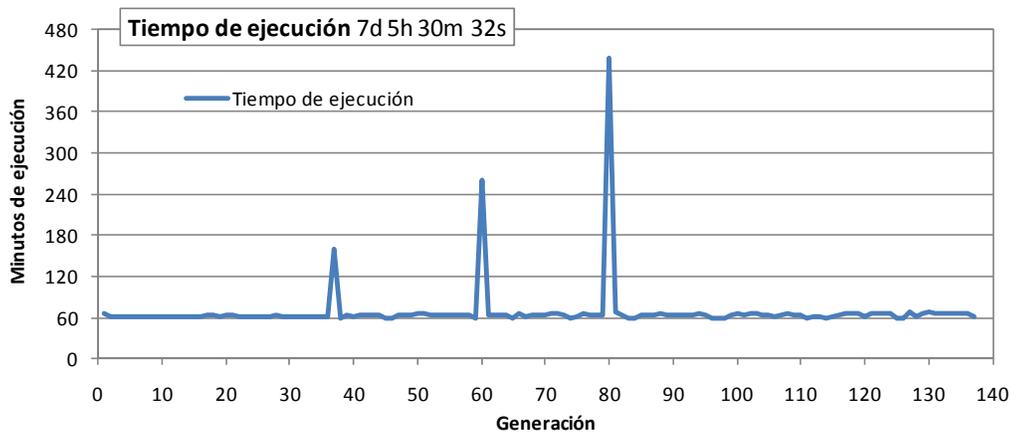


Figura 5.1 Tiempo de ejecución del algoritmo genético, detalle de las generaciones.

La duración prácticamente homogénea de las generaciones se explica por las siguientes razones: siempre simula, al menos, un caso completamente (elitismo). Cada uno de los nodos (procesadores) presentan características similares, logrando una capacidad de cómputo de 1 año simulado por cada hora de cómputo.

5.3 EVOLUCIÓN DE OBJETIVOS

5.3.1 Función aptitud

A modo de resumen se muestra en la Figura 5.2 la evolución de la función aptitud (línea roja), la cual, para los casos factibles coincide con la función objetivo. Se muestra también la evolución del límite superior teórico (línea segmentada) y el valor de aptitud promedio de la generación (línea azul). La tabla con los valores obtenidos se encuentra en el anexo B.

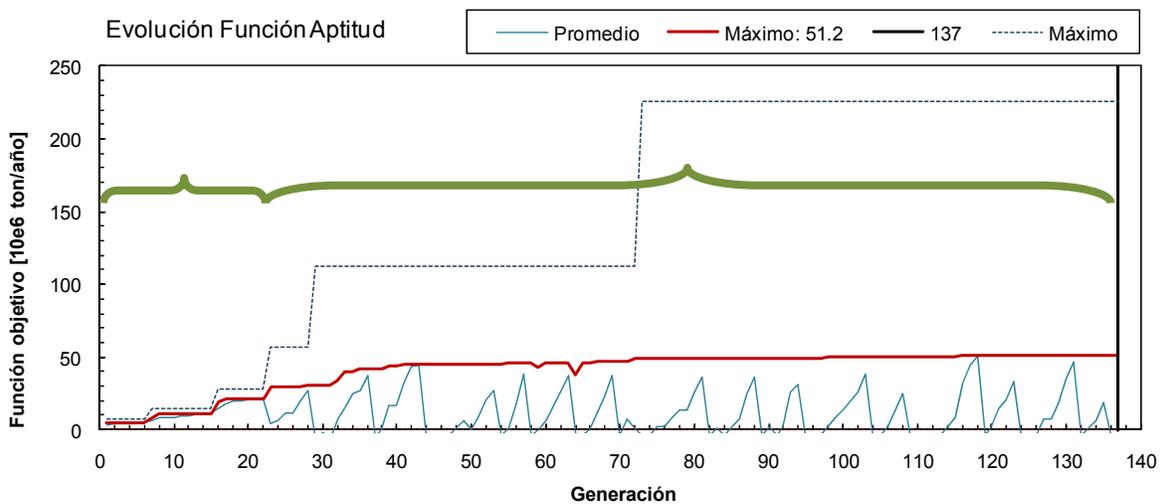


Figura 5.2 Evolución de la función aptitud o “fitness”.

Se observa en la Figura 5.2 diferentes etapas en el proceso evolutivo. En el comienzo (hasta la generación 22) el algoritmo adapta la población consiguiendo que tanto el mejor individuo como el promedio de la generación se acerquen rápidamente al máximo teórico, esta adaptación gatilla el cambio en el límite máximo impuesto en la restricción 4-4. Al existir nuevos límites para las tasas de extracción se genera un nuevo proceso de adaptación acelerado. El ciclo se repite hasta la generación 22, a partir de la cual, la evolución del valor promedio cambia de comportamiento. Este cambio se debe a que la actualización de límites y la activación de la técnica microGA conducen a la simulación de gran cantidad de casos infactibles.

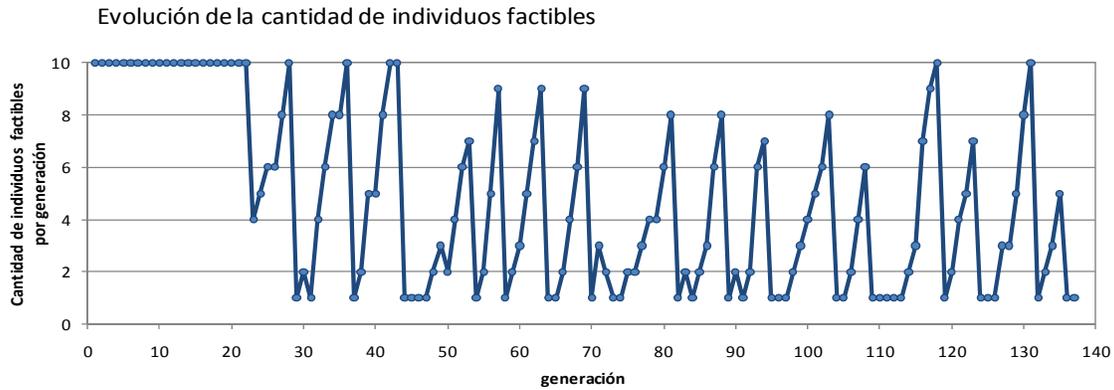


Figura 5.3 Evolución de la cantidad de individuos factibles por generación.

Se observa en la Figura 5.3, a partir de la generación 22, el cambio de comportamiento mencionado anteriormente. La forma dentada característica se explica por la utilización de la técnica microGA y elitismo, los cuales juntos a la utilización del operador genético de crossover generan una homogenización de los individuos en dirección hacia el mejor caso (sesgo genético del elitismo).

5.3.2 Funciones objetivo secundarias

Al utilizar algoritmos genéticos no es sorpresa que dentro de los individuos evaluados sean unos inferiores respecto de otros, esto queda en evidencia en la Figura 5.4.

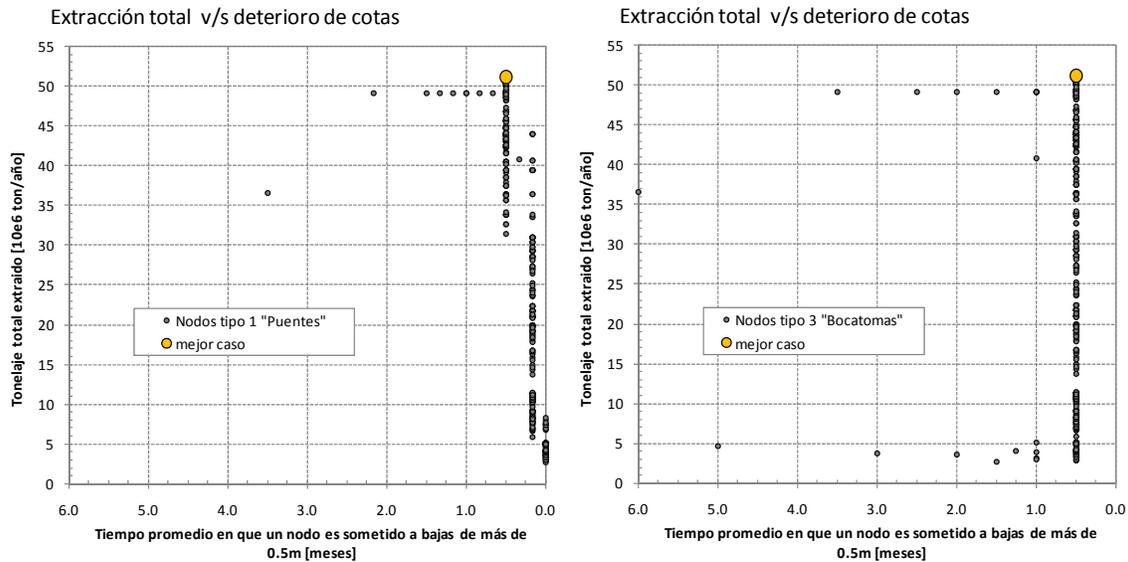


Figura 5.4 Dispersión de objetivos, objetivo principal v/s objetivos secundarios.

Al realizar la dispersión de los objetivos (principal v/s secundarios) se encuentra que existen niveles de productividad muy variados para un mismo nivel deterioro de la cota de fondo, tanto para los nodos que representan puentes como para los que representan bocatomas. La existencia de mejores esquemas productivos refuerza la idea de búsqueda del mejor esquema productivo. El deterioro de las cotas de fondo

observado en la Figura 5.4 para nodos clasificados como bocatoma ha mostrado mayor alineamiento en torno al valor 0.5 meses, en cambio los nodos tipo clasificados como puentes se presentan alineados por etapas en torno a 0, 0.17 y 0.5 progresivamente, mostrando una sugerente relación entre nivel de productividad y deterioro de las cotas de fondo. Las diferencias observadas entre los tipos de nodo refleja la relación espacial que existe entre la extracción de sedimentos y las bocatomas y puentes. Las bocatomas se ubican, en general, en las zonas altas para posibilitar el riego gravitacional de las zonas bajas, en la salida del cajón del Maipo. Las zonas de depositación más atractivas se encuentran donde se produce un cambio de pendiente (mayor a menor), esto ocurre a la salida del cajón del Maipo. La mayor cantidad de puentes se ubican dónde las actividades de las personas los requieren, ubicándose, en general, en las zonas bajas donde habita mayor cantidad de población y existe mayor actividad económica.

5.4 ESPACIO DE BÚSQUEDA

La técnica de modificación de límites implementada ha sido efectiva para asegurar la evolución desde el interior de la zona factible hacia sus límites.

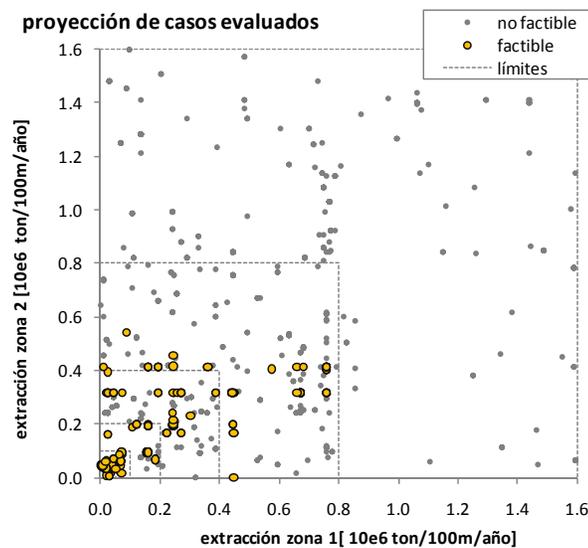


Figura 5.5 Proyección de casos simulados en el plano x1, x2.

En la Figura 5.5 se observa la proyección, en el plano x1, x2, de los casos simulados. Se observa en el gráfico que para los casos factibles, las tasas de extracción en la zona 1 son mayores que las de la zona 2. Las máximas tasas de la zona 1 se acercan a 0.8 [10^6 ton/100m/año]. Esto ha gatillado la ampliación del límite desde 0.8 hasta 1.6 [10^6 ton/100m/año]. El nivel inicial de tasas de extracción pensado de manera conservadora ha resultado serlo demasiado (o el criterio de descenso muy laxo), generándose 5 duplicaciones de los límites, de las cuales se aprecian 4.

5.4.1 Espacio factible

Se cuenta con 1370 observaciones puntuales del espacio de búsqueda y de esto se puede inferir algunas propiedades generales del espacio factible, este análisis es limitado debido principalmente a la técnica de solución implementada. Los algoritmos genéticos no garantizan que los individuos se encuentren en la frontera de productividad (obj1 v/s obj2) ni en el borde de la región factible. Sin embargo se puede observar los efectos que provoca la restricción de máximo descenso admisible.

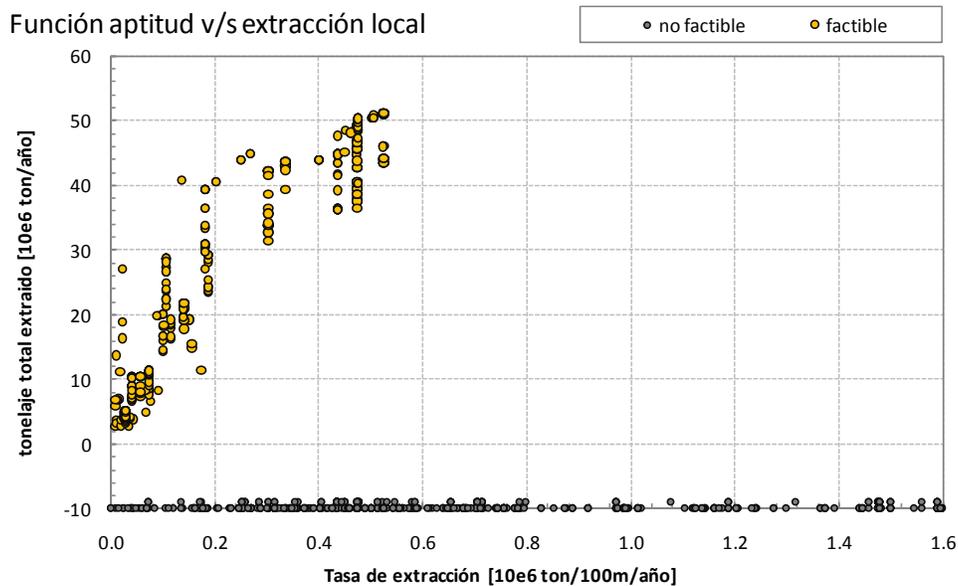


Figura 5.6 Casos ejecutados: Aptitud y extracción total v/s tasas de extracción local (Z. Extracción 4).

Se observa en la Figura 5.6 la segmentación entre casos factibles y casos no factibles, en el gráfico se muestra el efecto que esta condición tiene sobre la función aptitud. Los casos infactibles presentan valores de la función aptitud negativos, casi constantes. Este valor se debe a que la función de penalización ha sido diseñada para simulaciones con duración 10 años y de los cuales finalmente se ha utilizado 1. La implementación de la técnica microGA ha implicado el barrido aleatorio casi homogéneo del espacio de búsqueda. Se observa también gran cantidad de casos infactibles debido a 2 razones: Utilización de la técnica aleatoria (microGA) y la exagerada ampliación de los límites de búsqueda.

La envolvente observada de la región factible (puntos amarillos) se muestra similar entre los diferentes parámetros, ver ANEXO C, esto es consecuencia de la relación directa que existe entre la función objetivo y las variables de decisión (tasas de extracción).

Recordando la expresión 4-1:

$$\sum_{zc=1}^7 l_{zc} \cdot M_{zc} = \sum_{\substack{zc=1 \\ zc \neq j}}^7 l_{zc} \cdot M_{zc} + l_j \cdot M_j = K$$

Se deduce que manteniendo un mismo nivel productividad (K) suficientemente alto existe un límite inferior para la tasa de extracción local M_j . Esto se produce pues para compensar la pérdida de productividad local se debe aumentar la productividad de todo el resto de las zonas de extracción, generándose descensos mayores a 5 metros en alguna de estas zonas, de similar manera la tasa de extracción local se encuentra limitada superiormente pues dependiendo del comportamiento del río se generarán descensos mayores a tasas de extracción mayores. Por otro lado, para un mismo nivel de extracción local, la productividad total se encuentra acotada inferiormente por la productividad local y su longitud, superiormente se encuentra acotada debido a la respuesta del sistema, esto se debe a que: siendo el aporte local constante, un aumento de productividad debe basarse en el aumento de productividad de las restantes zonas de extracción, esto aumenta los descensos, llegándose eventualmente al máximo admisible.

A menores tasas de extracción local, el rango de variación de de la función objetivo es mayor, pues al menos la cota inferior es menor. Esta situación se evidencia en la Figura 5.6.

5.5 ESQUEMA DE EXTRACCIONES ÓPTIMO.

El mejor esquema de producción encontrado para un nivel de descenso máximo admisible de 5 metros es el indicado en la Tabla 5.2.

	Extracción específica	Longitud de la zona de extracción	Total extraído
	10e6 ton/100m/año	[m]	10e6 ton/año
zona 1	0.759	1300	9.9
zona 2	0.411	2500	10.3
zona 3	0.257	2800	7.2
zona 4	0.399	700	2.8
zona 5	0.178	2800	5.0
zona 6	0.220	1600	3.5
zona 7	0.525	2400	12.6
Total		14100	51.2

Tabla 5.2 Esquema de producción óptimo encontrado.

Este resultado se presenta coherente con los conceptos discutidos en el informe. Las zona 1 y 2 de extracciones, x_1 y x_2 en el gráfico, se encuentran ubicadas en una zona en la cual se produce un cambio

de pendiente longitudinal general del río. Las implicancias de este resultado se muestran en la Figura 5.7 y Figura 5.8.

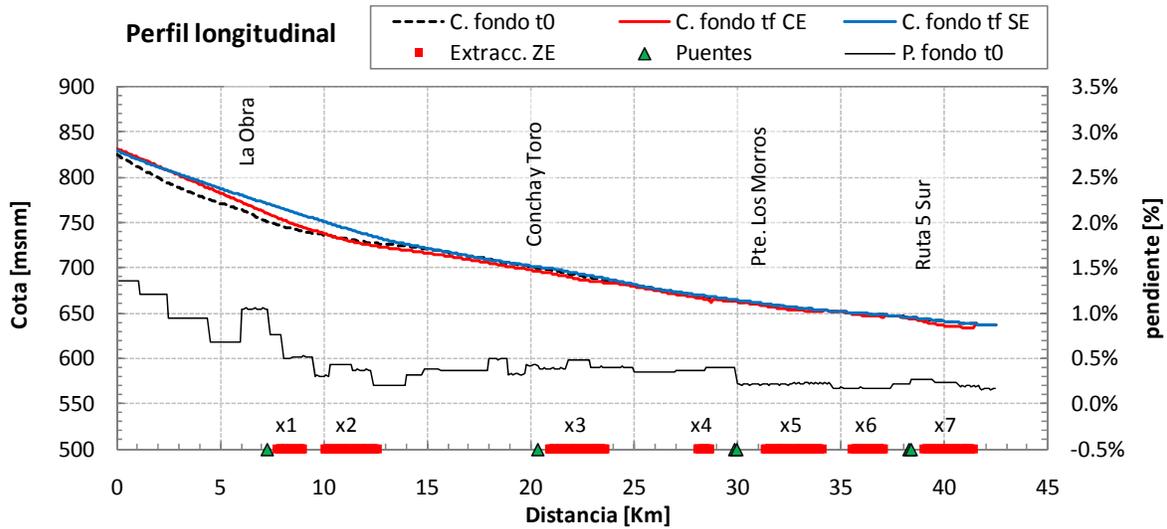


Figura 5.7 Situación inicial y final del lecho (Con extracciones y Sin Extracciones).

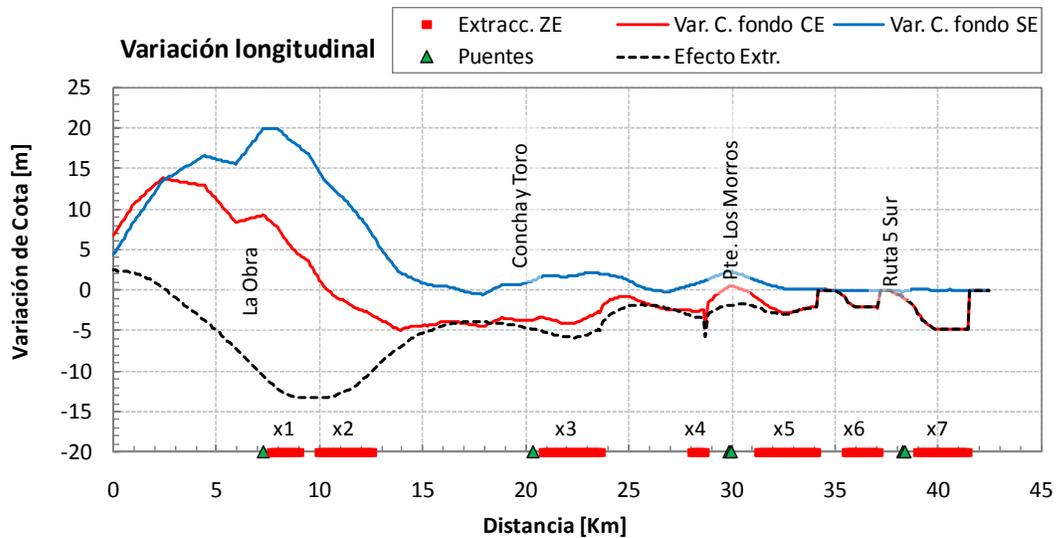


Figura 5.8 Cambio en las cotas de fondo del lecho (Con extracciones y Sin Extracciones)

El modelo, simulando una línea de base, presenta una gran agradación inducida por el cambio de pendiente entre la zona alta y la zona baja. Al modificar la granulometría se acelera los procesos de transporte de sedimentos y se exagera los niveles de perturbación, tanto como de ascenso como de descenso. El modelo de simulación no se encuentra limitado de sedimentos hacia aguas arriba, y la alimentación de sedimento depende exclusivamente de las características geométricas y de caudal en el primer nodo del modelo.

Como resultado de la intensiva y continua extracción de áridos simulada se obtiene un considerable deterioro de las cotas de fondo a lo largo de las zonas de extracción, salvo en la primera zona de extracción. El efecto de agradación es mayor que el de erosión inducida en la primera zona de extracción, esta zona presenta la más alta tasa de extracción de la solución encontrada, verificándose el potencial productivo de esta zona.

La segunda zona productiva, ubicada entre los 10 y los 12.5 km. de producción degrada las cotas de fondo in-situ, llegando a niveles de descenso máximos de 3 metros. El efecto conjunto de las dos primeras zonas de extracción manifiesta su mayor gravedad en el punto ubicado a 13.9 km desde el inicio del modelo. La degradación en este punto alcanza un nivel muy cercano al límite establecido para la simulación (4.95 v/s 5.0 m.)

En las cercanías del puente concha y toro, la línea de base (simulación sin extracciones) indica que las variaciones de cota de fondo serían ligeramente positivas, esto se debe a que el modelo en esta zona presenta un primer ensanchamiento (50 a 200 metros), lo que origina una pérdida de la capacidad de transporte. La simulación con extracciones obtiene un deterioro del orden de 4 metros desde la condición inicial (no línea de base) la cual se produce hasta el comienzo de la tercera zona de extracción.

Hacia el sector del puente Los Morros (30 km) el modelo en situación base muestra una agradación de 2 metros extendida en longitud, esta agradación se explica porque el modelo nuevamente presenta una reducción de la capacidad de transporte debido a un ensanchamiento sostenido, pasando de 100 a 600 metros de ancho.

Las últimas tres zonas productivas generan descensos localizados considerables, 3.0, 3.0 y 5.0 metros respectivamente, la dinámica en este sector es lenta debido a las condiciones geométricas imperantes y la reducida carga de sedimentos que ingresa a esta zona del río. Las pendientes bajas y las amplias secciones de escurrimiento no permiten el rellenar las zonas de extracción. Se observa claramente en las últimas dos zonas de extracción el efecto de erosión del borde de aguas arriba (perfil longitudinal suavizado), por el contrario, el borde de aguas abajo se muestra abrupto en su geometría.

6. CONCLUSIONES

6.1 GENERALES

Se ha generado la posibilidad de evaluar cualquier escenario de extracciones de sedimento grueso, esto posibilita la simulación de un esquema productivo actual o futuro cualquiera.

Se acoplado una herramienta de optimización con un modelo de simulación, resultando en una herramienta capaz de encontrar un esquema óptimo de extracciones de áridos.

Se ha aplicado exitosamente esta herramienta a un modelo que comparte importantes características con el sistema Maipo, la ubicación de infraestructura, la ubicación de zonas de extracción y geometría entre las localidades de “El Manzano” hasta aguas abajo del puente Ruta 5 Sur.

Se ha implementado la comunicación de instrucciones y resultados de manera robusta. Esto ha permitido el uso paralelo de 3 unidades de proceso (4+2+4 procesadores) para la realización de 1370 simulaciones en aproximadamente una semana.

Se ha encontrado una solución candidata que al ser analizada muestra ser coherente con los principios del transporte de sedimentos, resultando exagerada en cuanto a las modificaciones morfológicas debido a las modificaciones granulométricas realizadas y en parte a la consideración de caudal único en el Modelo de simulación. MOSSEM se muestra eficaz para realizar evolución morfológica del lecho.

6.2 DESEMPEÑO DEL ALGORITMO GENÉTICO

El algoritmo genético se ha mostrado eficaz en resolver el problema general planteado, a un costo computacional significativo, la simulación de 1 año demora 1 hora real, para evaluar 1370 casos utilizando 10 procesadores se requirió siete días de cómputo. Elaborar estrategias de penalización sofisticadas para la evaluación de individuos se presenta como una alternativa viable para mejorar el desempeño de la búsqueda.

El hecho de no requerir ninguna información extra del problema salvo poder evaluar la función objetivo limita las herramientas de análisis teórico. Una de sus implicancias es el hecho de no poder asegurar que el esquema de extracciones encontrado sea el óptimo, sin embargo el resultado obtenido se presenta como un candidato posible puesto que hace activa la restricción de descenso máximo admisible.

La implementación de actualización de límites máximos de acuerdo al desempeño ha realizado 5 modificaciones de límites, siendo la última exagerada. Se ha pasado de buscar en un hipercubo de 7 dimensiones acotado por 0.05 millones ton/100m/año a uno de tamaño 1.6 millones ton/100m/año en las generaciones 6, 15, 22, 28 y 72.

Si bien la técnica “microGA” ha realizado una contribución a la evolución paulatina del objetivo, se observa que produce un gran aumento del número de casos “infactibles”. Derrochando tiempo de cómputo en cada generación. Se recomienda implementar una técnica que agilizando la búsqueda no provoque este efecto (mutación clásica por ejemplo). La Tabla 6.1 muestra la cantidad de casos infactibles evaluados totales y en los segmentos correspondientes al cambio de comportamiento en la búsqueda descrita en el capítulo de resultados.

	Total		GEN 1 a 22		GEN 23 a 137	
Total de simulaciones	1370	100%	220	100%	1140	100%
Factibles	659	48%	220	100%	439	39%
Infactibles	711	52%	0	0%	701	61%

Tabla 6.1 Factibilidad de los casos enviados a simular.

La comunicación de instrucciones ha sido robusta, incluso se ha puesto a prueba, de manera involuntaria, al sufrir una desconexión de más de 6 horas en uno de los computadores, retrasando el proceso, pero no invalidándolo, pues GA permite retomar las simulaciones desde la última generación ejecutada exitosamente.

6.3 SOBRE LA SOLUCIÓN ENCONTRADA

Considerando que el modelo de simulación representa las características generales del sistema Maipo, no toda su complejidad, se menciona que se observó en la solución encontrada que se produjo una degradación generalizada de las cotas de fondo en las zonas de extracción bajas, zonas menos dinámicas y afectadas por el déficit de sedimentos inducido. La efectividad que tiene el aumento de tasas de extracción sobre la producción total se relaciona con el tamaño de cada zona de extracción. La zona 7 presenta altas tasas de extracción en la solución encontrada, sin embargo se ubica en la zona menos dinámica del río.

Se ha confirmado la potencialidad extractiva tanto de la zona 1 como de la zona 2 ubicadas sobre el cambio de pendiente longitudinal del sistema, tal como se muestra en la Figura 5.8. Estas zonas presentando tasas de extracción altas, no degradan (desde la condición inicial) la cota de fondo, pero si se observa una diferencia significativa desde la condición final que se encontraría si no hubiese extracciones (diferencia con línea de base).

Se ha definido correctamente un problema de optimización conducente a la maximización de la productividad de áridos en el sistema. La restricción de descenso máximo admisible es la que ha resultado limitar la producción de áridos, como era esperado, puesto que las limitaciones del espacio de búsqueda han sido salvadas mediante la técnica de modificación de límites implementada.

RECOMENDACIONES

El principal obstáculo a la realización de una aplicación más realista del sistema Maipo es el tiempo de simulación requerido, 1 hora de cómputo por año de simulación para 408 perfiles transversales. Una vía posible para salvar el problema del tiempo de simulación es disminuir criteriosamente la utilización de un modelo de simulación costoso como lo es MOSSEM. Debido a la naturaleza no lineal del proceso de transporte de sedimentos, se podrá evaluar para qué caudal el transporte de fondo es despreciable, definiendo un umbral, esto variará de sección en sección debido a las diferencias de pendiente y ancho de sección, pero en un principio, podría definirse para la sección que presente mayor transporte. Teniendo claro los momentos en que se produce el transporte de fondo se podrá evaluar de manera detallada la evolución morfológica en estos períodos, resolviendo las Ecuaciones de Saint-Venant, y utilizar un modelo simplificado tipo onda cinemática para el resto del tiempo. Otra alternativa es abandonar la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant y almacenar el comportamiento del sistema en curvas de descarga que caractericen el sistema, ahorrando con ello tiempo de cálculo.

Al pensar en una aplicación para la gestión integrada de sedimentos y agua se debe necesariamente incorporar las variaciones longitudinales de caudal, las cuales cambian la capacidad de transporte. La representatividad del modelo mejorará con la inclusión de las extracciones de caudal que se producen a lo largo del río Maipo, para esto se deberá incluir los criterios de asignación de cuotas de caudal definidas para el sistema, así como las restituciones de algunas centrales hidroeléctricas y aportes de afluentes. La inclusión de estos criterios llevará a un cambio en el comportamiento de la evolución morfológica del río Maipo, si las zonas altas se mostraban aptas para las extracciones de áridos, con mayor razón se depositarán sedimentos al pie de las bocatomas, al disminuir la capacidad de transporte. La correcta evaluación de los impactos sobre infraestructura supone una adecuada caracterización de la resistencia de las estructuras y de fenómenos de socavación local, así como una mejor aproximación conceptual a la resolución del flujo en los canales de la zona trezada del río.

La utilización de una herramienta de búsqueda aleatoria permite evadir preguntas sobre el espacio factible al no depender de este, pero caracterizarlo agrega información importante y sintetiza las relaciones entre variables de decisión (extracciones) y variables de estado (descensos), con ello se podría tener mayor capacidad predictiva sin tener que recurrir a una simulación para cada escenario posible de explotación. Se recomienda indagar en metodologías de búsqueda de fronteras de productividad utilizando técnicas aleatorias.

REFERENCIAS

Astudillo, J., y Tamburrino, A. 2005. "La modelación numérica como herramienta hidrofluvial. Análisis del modelo 1d Mike 11.", XVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Valparaíso, Chile.

Coello, C., 2001, "*Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art*", "*Computational methods applied to Mechanical Engineering*", N°191, 1245-1287.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 2003. "Diálogo Nacional Chile, Agua, Agricultura y Medio Ambiente", Santiago, Chile.

Comisión Nacional de Áridos, Cámara Chilena de la Construcción. 2001. Industria del Árido en Chile, Tomos 1 y 2, Santiago, Chile.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), Geotécnica Consultores. 1999. Diagnóstico de estabilizadores en bermas y paraderos de tierra.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), 2006. "Estrategia Nacional de Cuencas", "Taller Internacional: Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas", CEPAL, Santiago, Chile.

De Jong, K.A., 1990, "*Introduction to the second special issue on genetic algorithms*", "*Machine Learning*", 5(4), 351-353.

Forrest, S., Mitchell, M.L., 1993, "*What makes a problem hard for genetic algorithm?, some anomalous results and their explanation*", "*Machine learning*" N°13, Pp285-319.

I. Municipalidad de Limache, 2005, Decreto N° 2718, "Ordenanza para la extracción de áridos desde cauces naturales".

I. Municipalidad de Puente Alto, I. Municipalidad de Pirque, 2005, "Sobre administración conjunta del río Maipo".

Kondolf, G.M., 1994. "*Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining*". "*Landscape and urban planning*" N°28. Pp 225-243.

Kondolf, G.M., 1997. "*Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels*". "*Environmental Management*" Vol. 21. N°4. Pp 533-551.

Kondolf, G.M., Piégay, H. Landon, N., 2002. "*Channel response to increased and decreased bedload supply from land use change: contrast between two catchment*". "*Geomorphology*" N°45. Pp 35-51.

Kondolf, G.M., Smeltzer, M., Kimball L., 2001. “*Fresh water gravel minning and dredging issues*”. “*Center for environmental design research*”, UCLA, Berkeley.

Marczyk, A., 2004, “Algoritmos genéticos y computación evolutiva”. <http://www.talkorigins.org/faqs/genalg/genalg.html> (visitado: diciembre 2009).

Ministerio de Bienes Nacionales, 1978, Decreto Supremo N°609.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). 1997. DFL-850, ley 15840 (1964) y DFL-206 (1960), Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección General de Aguas (DGA), CADE-IDEPE. 2004. “Diagóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivo de Calidad. Cuenca del río Maipo”, Santiago, Chile.

Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección General de Aguas (DGA), Departamento de Administración de Recursos Hídricos. 2003. “Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Maipo”, S.D.T. n°145, Santiago, Chile.

Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). 1998. “Extracción Mecanizada de Áridos Desde Cauces Naturales”, Santiago, Chile.

Mitchell, M.I., 1996, “*An introduction to genetic algorithms*”, MIT Press.

Niño, Y., 2005, “Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos”, CI61F Transporte Hidráulico de Sólidos.

Quiróz, A. y Niño, Y., 2001. “Metodología para el análisis de extracción de áridos en cauces naturales chilenos. Aplicación al río Aconcagua”. Santiago, Chile.

Rutkowski, L., 2008. “*Computational Intelligence, methods and techniques*”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, PWN, Pp 265.

Shumm, S., 1977. *The fluvial System*. Wiley, New York.

Swallow B., Sang J., Nyabenge M., Bundotich D., Duraiappah A., Yatich T. 2009. “*Tradeoffs, synergies and traps among ecosystem services in Lake Victoria basin of East Africa*”, “*Environmental Science & Policy*”, N°12 Pp 504-519.

Wu, W., Lin, C., 2004, "The second generation of self-organizing adaptive penalty strategy for constrained genetic search", "Advances in engineering software", N°35, Pp 815-825.

ANEXO A
“INFORMACION DEL MODELO”

GEOMETRÍA DEL MODELO

se detallan las 408 secciones con su distancia acumulada desde el inicio, cota de fondo original y ancho basal del cauce, se ha utilizado taludes unitarios para ambas riberas y un coeficiente de rugosidad de Manning igual a 0.035.

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
1	0.0	824.62	43.7
2	101.7	823.25	44.0
3	203.4	821.87	44.2
4	305.1	820.50	44.4
5	406.8	819.13	44.6
6	508.4	817.76	44.8
7	610.1	816.38	45.1
8	711.8	815.01	45.3
9	813.5	813.64	45.5
10	915.2	812.26	45.7
11	1016.9	810.89	45.9
12	1123.3	809.60	46.5
13	1229.8	808.31	47.0
14	1336.2	807.02	47.5
15	1442.6	805.74	48.1
16	1549.1	804.45	48.6
17	1655.5	803.16	49.2
18	1762.0	801.87	49.7
19	1868.4	800.58	50.2
20	1974.8	799.29	50.8
21	2081.3	798.01	51.3
22	2187.7	796.72	51.8
23	2294.1	795.43	52.4
24	2400.6	794.14	52.9
25	2505.7	793.15	53.4
26	2610.8	792.16	53.9
27	2715.9	791.17	54.4
28	2821.0	790.18	54.8
29	2926.1	789.19	55.3
30	3031.1	788.20	55.8
31	3136.2	787.21	56.3
32	3241.3	786.22	56.8

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
33	3346.4	785.23	57.2
34	3451.5	784.24	57.7
35	3556.6	783.25	58.2
36	3661.7	782.26	58.7
37	3766.8	781.27	59.2
38	3871.9	780.28	59.7
39	3977.0	779.29	60.1
40	4082.1	778.30	60.6
41	4187.2	777.31	61.1
42	4292.3	776.32	61.6
43	4397.4	775.33	62.1
44	4499.9	774.63	63.3
45	4602.4	773.93	64.5
46	4704.9	773.24	65.7
47	4807.5	772.54	66.9
48	4910.0	771.84	68.1
49	5012.5	771.14	69.2
50	5115.1	770.44	70.4
51	5217.6	769.75	71.6
52	5320.1	769.05	72.8
53	5422.6	768.35	74.0
54	5525.2	767.65	75.2
55	5627.7	766.95	76.4
56	5730.2	766.26	77.6
57	5832.7	765.56	78.8
58	5935.3	764.86	80.0
59	6037.3	763.79	79.8
60	6139.4	762.72	79.6
61	6241.4	761.64	79.4
62	6343.5	760.57	79.2
63	6445.5	759.50	79.0
64	6547.6	758.43	78.7

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
65	6649.6	757.35	78.5
66	6751.7	756.28	78.3
67	6853.7	755.21	78.1
68	6955.8	754.14	77.9
69	7057.8	753.06	77.7
70	7159.9	751.99	77.5
71	7261.9	750.92	77.3
72	7373.3	750.07	77.7
73	7484.7	749.22	78.1
74	7596.0	748.37	78.5
75	7707.4	747.52	78.9
76	7818.8	746.67	79.4
77	7930.2	745.82	79.8
78	8041.0	745.27	82.6
79	8151.8	744.72	85.5
80	8262.6	744.17	88.4
81	8373.4	743.62	91.2
82	8480.8	743.06	91.3
83	8588.2	742.50	91.3
84	8695.6	741.94	91.4
85	8802.9	741.38	91.5
86	8910.3	740.82	91.5
87	9017.7	740.25	91.6
88	9125.1	739.69	91.6
89	9232.5	739.13	91.7
90	9339.9	738.57	91.7
91	9447.3	738.01	91.8
92	9557.3	737.68	91.6
93	9667.3	737.34	91.4
94	9777.2	737.01	91.2
95	9887.2	736.68	90.9
96	9997.2	736.35	90.7

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
97	10107.2	736.01	90.5
98	10217.1	735.68	90.3
99	10326.9	735.20	90.8
100	10436.6	734.72	91.2
101	10546.4	734.25	91.7
102	10656.1	733.77	92.2
103	10765.9	733.29	92.7
104	10875.6	732.81	93.1
105	10985.3	732.33	93.6
106	11095.1	731.86	94.1
107	11204.8	731.38	94.5
108	11314.6	730.90	95.0
109	11421.2	730.51	95.0
110	11527.8	730.12	95.0
111	11634.4	729.72	95.0
112	11741.1	729.33	95.0
113	11847.7	728.94	95.1
114	11954.3	728.55	95.1
115	12060.9	728.15	95.1
116	12167.6	727.76	95.1
117	12274.2	727.37	95.1
118	12376.8	727.17	92.4
119	12479.4	726.96	89.7
120	12582.1	726.76	87.0
121	12684.7	726.56	84.3
122	12787.3	726.35	81.6
123	12890.0	726.15	78.9
124	12992.6	725.95	76.2
125	13095.2	725.75	73.6
126	13197.8	725.54	70.9
127	13300.5	725.34	68.2
128	13403.1	725.14	65.5
129	13505.7	724.93	62.8
130	13608.3	724.73	60.1
131	13711.0	724.53	57.4
132	13813.6	724.32	54.7
133	13916.2	724.12	52.0
134	14019.9	723.80	55.9

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
135	14123.7	723.48	59.8
136	14227.4	723.16	63.6
137	14331.1	722.84	67.5
138	14434.8	722.51	71.4
139	14538.6	722.19	75.3
140	14642.3	721.87	79.1
141	14746.0	721.55	83.0
142	14859.3	721.11	79.6
143	14972.6	720.67	76.1
144	15085.9	720.23	72.7
145	15199.2	719.80	69.3
146	15312.5	719.36	65.9
147	15425.7	718.92	62.4
148	15539.0	718.48	59.0
149	15649.0	718.08	62.6
150	15759.0	717.68	66.2
151	15869.0	717.27	69.8
152	15979.0	716.87	73.4
153	16089.0	716.47	77.0
154	16198.9	716.07	80.6
155	16308.9	715.66	84.2
156	16418.9	715.26	87.8
157	16528.9	714.86	91.4
158	16634.8	714.48	89.6
159	16740.8	714.09	87.8
160	16846.8	713.71	86.0
161	16952.7	713.32	84.2
162	17058.7	712.94	82.4
163	17164.7	712.55	80.6
164	17270.6	712.17	78.8
165	17376.6	711.78	77.0
166	17482.5	711.40	75.2
167	17588.5	711.01	73.4
168	17694.5	710.63	71.6
169	17800.4	710.24	69.8
170	17906.4	709.86	68.0
171	18010.9	709.34	66.6
172	18115.3	708.82	65.1

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
173	18219.8	708.30	63.7
174	18324.3	707.78	62.2
175	18428.7	707.27	60.8
176	18533.2	706.75	59.3
177	18637.7	706.23	57.9
178	18742.1	705.71	56.4
179	18846.6	705.19	55.0
180	18951.0	704.86	56.1
181	19055.4	704.52	57.3
182	19159.8	704.19	58.4
183	19264.3	703.85	59.6
184	19368.7	703.51	60.7
185	19473.1	703.18	61.8
186	19577.5	702.85	63.0
187	19681.9	702.51	64.1
188	19793.8	702.03	61.6
189	19905.6	701.56	59.1
190	20017.4	701.09	56.6
191	20129.3	700.61	54.1
192	20241.1	700.13	51.6
193	20353.0	699.66	49.1
194	20455.3	699.27	56.5
195	20557.5	698.88	63.8
196	20659.8	698.48	71.2
197	20762.1	698.09	78.5
198	20864.3	697.70	85.9
199	20966.6	697.31	93.2
200	21068.9	696.91	100.5
201	21171.1	696.52	107.9
202	21273.4	696.13	115.2
203	21375.7	695.74	122.6
204	21477.9	695.34	129.9
205	21580.2	694.95	137.3
206	21682.5	694.56	144.6
207	21783.8	694.07	141.8
208	21885.2	693.59	139.0
209	21986.5	693.10	136.3
210	22087.9	692.62	133.5

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
211	22189.2	692.13	130.7
212	22290.6	691.65	127.9
213	22391.9	691.16	125.1
214	22493.3	690.68	122.4
215	22594.6	690.19	119.6
216	22696.0	689.71	116.8
217	22797.3	689.22	114.0
218	22899.1	688.81	119.3
219	23000.9	688.40	124.6
220	23102.7	687.99	129.9
221	23204.6	687.58	135.1
222	23306.4	687.17	140.4
223	23408.2	686.75	145.7
224	23510.0	686.34	151.0
225	23611.8	685.93	156.3
226	23713.6	685.52	161.6
227	23815.4	685.11	166.9
228	23917.3	684.70	172.1
229	24019.1	684.29	177.4
230	24120.9	683.88	182.7
231	24222.7	683.47	188.0
232	24324.5	683.06	193.3
233	24426.3	682.64	198.6
234	24528.1	682.23	203.9
235	24630.0	681.82	209.1
236	24731.8	681.41	214.4
237	24833.6	681.00	219.7
238	24935.4	680.59	225.0
239	25036.7	680.23	218.8
240	25138.1	679.88	212.5
241	25239.4	679.52	206.3
242	25340.7	679.16	200.0
243	25442.0	678.81	193.8
244	25543.4	678.45	187.5
245	25644.7	678.09	181.3
246	25746.0	677.74	175.0
247	25847.4	677.38	168.8
248	25948.7	677.03	162.5

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
249	26050.0	676.67	156.3
250	26151.3	676.31	150.0
251	26252.7	675.96	143.8
252	26354.0	675.60	137.5
253	26455.3	675.24	131.3
254	26556.7	674.89	125.0
255	26658.0	674.53	118.8
256	26759.3	674.17	112.5
257	26860.6	673.82	106.3
258	26962.0	673.46	100.0
259	27063.8	673.08	101.2
260	27165.7	672.70	102.3
261	27267.6	672.33	103.5
262	27369.4	671.95	104.7
263	27471.3	671.57	105.9
264	27573.2	671.19	107.0
265	27675.0	670.82	108.2
266	27776.9	670.44	109.4
267	27878.8	670.06	110.6
268	27980.6	669.68	111.7
269	28082.5	669.30	112.9
270	28184.4	668.93	114.1
271	28286.2	668.55	115.2
272	28388.1	668.17	116.4
273	28494.1	667.75	118.3
274	28600.1	667.33	120.2
275	28706.1	666.91	122.1
276	28812.1	666.49	124.0
277	28918.1	666.07	125.8
278	29024.1	665.65	127.7
279	29130.1	665.23	129.6
280	29236.1	664.81	131.5
281	29342.1	664.39	133.4
282	29448.1	663.97	135.3
283	29554.1	663.55	137.2
284	29660.1	663.13	139.0
285	29766.1	662.71	140.9
286	29872.0	662.29	142.8

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
287	29974.4	662.07	148.7
288	30076.8	661.85	154.6
289	30179.2	661.64	160.4
290	30281.6	661.42	166.3
291	30384.0	661.20	172.2
292	30486.4	660.98	178.1
293	30588.8	660.77	183.9
294	30691.2	660.55	189.8
295	30793.6	660.33	195.7
296	30896.0	660.11	201.6
297	30998.3	659.89	207.5
298	31100.7	659.68	213.3
299	31203.1	659.46	219.2
300	31305.5	659.24	225.1
301	31407.9	659.02	231.0
302	31510.3	658.81	236.8
303	31612.7	658.59	242.7
304	31715.1	658.37	248.6
305	31817.5	658.15	254.5
306	31919.9	657.93	260.4
307	32022.3	657.72	266.2
308	32124.6	657.50	272.1
309	32227.0	657.28	278.0
310	32329.4	657.06	283.9
311	32431.8	656.85	289.7
312	32534.2	656.63	295.6
313	32636.6	656.41	301.5
314	32741.1	656.17	312.3
315	32845.5	655.94	323.0
316	32950.0	655.70	333.8
317	33054.5	655.47	344.5
318	33158.9	655.24	355.3
319	33263.4	655.00	366.0
320	33367.8	654.76	376.8
321	33472.3	654.53	387.5
322	33576.8	654.29	398.3
323	33681.2	654.06	409.0
324	33785.7	653.82	419.8

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
325	33890.2	653.59	430.5
326	33994.6	653.35	441.3
327	34099.1	653.12	452.0
328	34203.6	652.88	462.8
329	34308.0	652.65	473.5
330	34412.5	652.41	484.3
331	34516.9	652.18	495.0
332	34618.7	652.01	498.5
333	34720.5	651.84	502.0
334	34822.3	651.67	505.5
335	34924.1	651.50	509.0
336	35025.9	651.32	512.5
337	35127.6	651.15	516.0
338	35229.4	650.98	519.5
339	35331.2	650.81	523.0
340	35433.0	650.64	526.5
341	35534.8	650.47	530.0
342	35636.5	650.30	533.5
343	35738.3	650.13	537.0
344	35840.1	649.96	540.5
345	35941.9	649.78	544.0
346	36043.7	649.61	547.5
347	36145.4	649.44	551.0
348	36247.2	649.27	554.5
349	36349.0	649.10	558.0
350	36453.7	648.92	551.8
351	36558.3	648.74	545.6
352	36663.0	648.56	539.5

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
353	36767.7	648.38	533.3
354	36872.3	648.20	527.1
355	36977.0	648.02	520.9
356	37081.7	647.84	514.7
357	37186.3	647.66	508.6
358	37291.0	647.48	502.4
359	37395.7	647.30	496.2
360	37497.0	647.08	476.6
361	37598.4	646.86	456.9
362	37699.7	646.64	437.3
363	37801.1	646.42	417.7
364	37902.4	646.20	398.0
365	38003.7	645.98	378.4
366	38105.1	645.76	358.8
367	38206.4	645.54	339.1
368	38307.8	645.32	319.5
369	38409.6	645.05	341.2
370	38511.4	644.78	362.9
371	38613.3	644.51	384.6
372	38715.1	644.24	406.2
373	38816.9	643.97	427.9
374	38918.7	643.69	449.6
375	39020.5	643.42	471.3
376	39122.4	643.15	493.0
377	39224.2	642.88	514.6
378	39326.0	642.61	536.3
379	39427.8	642.34	558.0
380	39531.9	642.09	558.0

Secc.	Dist L.	Cota F	Ancho
	m	msnm	m
381	39636.0	641.85	558.0
382	39740.1	641.60	558.0
383	39844.2	641.36	558.0
384	39948.3	641.11	558.0
385	40052.5	640.87	558.0
386	40156.6	640.62	558.0
387	40260.7	640.38	558.0
388	40364.8	640.13	558.0
389	40468.9	639.89	558.0
390	40573.0	639.64	558.0
391	40677.7	639.43	558.0
392	40782.5	639.23	558.0
393	40887.2	639.02	558.0
394	40992.0	638.82	558.0
395	41096.7	638.61	558.0
396	41201.5	638.40	558.0
397	41306.3	638.20	558.0
398	41411.0	637.99	558.0
399	41515.8	637.79	558.0
400	41620.5	637.58	558.0
401	41726.6	637.41	558.0
402	41832.7	637.25	558.0
403	41938.8	637.08	558.0
404	42044.9	636.91	558.0
405	42151.0	636.74	558.0
406	42257.1	636.58	558.0
407	42363.2	636.41	558.0
408	42469.3	636.24	558.0

CURVA GRANULOMÉTRICA

Se ha modificado la curva granulométrica, a partir de los 2 milímetros aumentando el porcentaje que pasa para igual tamaño de grano.

Original	
[m]	% pasa
0.105	100
0.061	94.82
0.037	67.89
0.02	42.39
0.019	37.6
0.0125	27.34
0.00952	23.31
0.00476	16.19
0.00236	11.57
0.002	10.81
0.0006	7.8
0.00042	6.95
0.0003	5.81
0.00015	3.14
0.000074	1.4

Modificada	
[m]	% pasa
0.061	100
0.037	95
0.02	85
0.019	75
0.0125	60
0.00952	50
0.00476	30
0.00236	22
0.002	20
0.0006	7.8
0.00042	6.95
0.0003	5.81
0.00015	3.14
0.000074	1.4

ANEXO B

“GENERACIONES EJECUTADAS”

GENERACIONES EJECUTADAS.

GEN	Mejor	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	OBJ1	OBJ2	OBJ3
1	2	0.0437	0.0468	0.0289	0.0170	0.0451	0.0340	0.0285	5.16	0.00	1.00
2	2	0.0437	0.0468	0.0289	0.0170	0.0451	0.0340	0.0285	5.16	0.00	0.50
3	3	0.0437	0.0468	0.0289	0.0170	0.0451	0.0340	0.0285	5.16	0.00	0.50
4	3	0.0437	0.0468	0.0289	0.0170	0.0451	0.0340	0.0285	5.16	0.00	0.50
5	5	0.0437	0.0468	0.0289	0.0170	0.0451	0.0340	0.0285	5.16	0.00	0.50
6	6	0.0437	0.0468	0.0289	0.0170	0.0451	0.0340	0.0285	5.16	0.00	0.50
7	2	0.0075	0.0462	0.0983	0.0912	0.0450	0.0102	0.0744	7.85	0.17	0.50
8	3	0.0686	0.0614	0.0963	0.0319	0.0994	0.0882	0.0406	10.50	0.17	0.50
9	8	0.0686	0.0614	0.0963	0.0319	0.0994	0.0882	0.0406	10.50	0.17	0.50
10	5	0.0686	0.0614	0.0963	0.0319	0.0994	0.0877	0.0744	11.30	0.17	0.50
11	7	0.0686	0.0614	0.0963	0.0319	0.0994	0.0877	0.0744	11.30	0.17	0.50
12	5	0.0686	0.0614	0.0963	0.0319	0.0994	0.0877	0.0744	11.30	0.17	0.50
13	9	0.0686	0.0614	0.0963	0.0319	0.0994	0.0877	0.0744	11.30	0.17	0.50
14	2	0.0686	0.0614	0.0963	0.0319	0.0994	0.0877	0.0744	11.30	0.17	0.50
15	10	0.0686	0.0614	0.0963	0.0319	0.0994	0.0882	0.0744	11.30	0.17	0.50
16	9	0.1564	0.0933	0.1404	0.0894	0.1988	0.0688	0.1516	19.20	0.17	0.50
17	6	0.1610	0.1931	0.1100	0.1613	0.1964	0.1088	0.1405	21.70	0.17	0.50
18	1	0.1610	0.1931	0.1100	0.1613	0.1964	0.1088	0.1405	21.70	0.17	0.50
19	9	0.1610	0.1931	0.1100	0.1613	0.1964	0.1088	0.1405	21.70	0.17	0.50
20	1	0.1610	0.1931	0.1100	0.1613	0.1964	0.1088	0.1405	21.70	0.17	0.50
21	2	0.1610	0.1931	0.1100	0.1613	0.1964	0.1088	0.1405	21.70	0.17	0.50
22	6	0.1610	0.1931	0.1100	0.1613	0.1964	0.1088	0.1405	21.70	0.17	0.50
23	4	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1593	0.1465	0.1864	29.30	0.17	0.50
24	4	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1593	0.1465	0.1864	29.30	0.17	0.50
25	4	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1593	0.1465	0.1864	29.30	0.17	0.50
26	9	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1593	0.1465	0.1864	29.30	0.17	0.50
27	1	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1593	0.1465	0.1864	29.30	0.17	0.50
28	7	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1593	0.2558	0.1811	30.90	0.17	0.50
29	1	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1594	0.2558	0.1811	30.90	0.17	0.50
30	5	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1594	0.2558	0.1811	30.90	0.17	0.50
31	6	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1594	0.2558	0.1811	30.90	0.17	0.50
32	10	0.2441	0.2000	0.2510	0.3993	0.1594	0.2560	0.3026	33.80	0.50	0.50
33	8	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1594	0.2558	0.1811	39.40	0.17	0.50
34	5	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1594	0.2558	0.1811	39.40	0.17	0.50
35	9	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1594	0.2560	0.3026	42.30	0.50	0.50
36	6	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1594	0.2560	0.3026	42.30	0.50	0.50
37	1	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1594	0.2560	0.3026	42.30	0.50	0.50
38	8	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1594	0.2560	0.3026	42.30	0.50	0.50
39	10	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4006	44.00	0.50	0.50
40	3	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4006	44.00	0.50	0.50

GEN	Mejor	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	OBJ1	OBJ2	OBJ3
41	6	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
42	5	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
43	7	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
44	1	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
45	10	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
46	9	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
47	4	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
48	6	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
49	6	0.0256	0.3938	0.5552	0.0487	0.1055	0.5124	0.4355	44.80	0.50	0.50
50	4	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
51	9	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
52	6	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
53	5	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
54	1	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4355	44.80	0.50	0.50
55	4	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4727	45.70	0.50	0.50
56	2	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4727	45.70	0.50	0.50
57	8	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	45.70	0.50	0.50
58	1	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	45.70	0.50	0.50
59	5	0.4424	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	42.70	0.50	0.50
60	4	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	45.70	0.50	0.50
61	2	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	45.70	0.50	0.50
62	4	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	45.70	0.50	0.50
63	9	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	45.70	0.50	0.50
64	1	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	37.50	0.50	0.50
65	10	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	45.70	0.50	0.50
66	1	0.6717	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	45.70	0.50	0.50
67	8	0.7592	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	46.80	0.50	0.50
68	5	0.7592	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	46.80	0.50	0.50
69	7	0.7592	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	46.80	0.50	0.50
70	1	0.7592	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	46.80	0.50	0.50
71	7	0.7592	0.3161	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	46.80	0.50	0.50
72	4	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
73	1	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
74	8	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
75	7	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
76	4	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
77	7	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
78	9	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
79	7	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
80	10	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
81	4	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.67	1.00
82	1	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.83	1.00

GEN	Mejor	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	OBJ1	OBJ2	OBJ3
83	8	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	1.00	1.00
84	10	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	1.00	1.00
85	10	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	1.00	1.00
86	4	0.7592	0.4052	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.10	0.50	0.50
87	4	0.7592	0.4114	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.20	0.50	0.50
88	5	0.7592	0.4114	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.20	0.50	0.50
89	1	0.7592	0.4114	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4733	49.20	0.50	0.50
90	7	0.7592	0.4114	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4745	49.30	0.50	0.50
91	2	0.7592	0.4114	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4745	49.30	0.50	0.50
92	7	0.7592	0.4114	0.2510	0.3993	0.1542	0.2232	0.4745	49.30	0.50	0.50
93	5	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1542	0.2232	0.4745	49.40	0.50	0.50
94	9	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1542	0.2232	0.4745	49.40	0.50	0.50
95	1	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1542	0.2232	0.4745	49.40	0.50	0.50
96	10	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1542	0.2232	0.4745	49.40	0.50	0.50
97	5	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1542	0.2232	0.4745	49.40	0.50	0.50
98	5	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
99	8	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
100	7	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
101	6	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
102	7	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
103	10	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
104	1	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
105	1	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
106	5	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
107	6	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
108	9	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
109	1	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
110	4	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
111	7	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
112	8	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
113	10	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2232	0.4745	50.00	0.50	0.50
114	10	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2071	0.5021	50.40	0.50	0.50
115	9	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2071	0.5021	50.40	0.50	0.50
116	8	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1747	0.2071	0.5245	50.90	0.50	0.50
117	10	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5245	51.20	0.50	0.50
118	6	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5245	51.20	0.50	0.50
119	1	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5245	51.20	0.50	0.50
120	6	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
121	4	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
122	9	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
123	6	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
124	1	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50

GEN	Mejor	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	OBJ1	OBJ2	OBJ3
125	5	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
126	8	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
127	3	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
128	9	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
129	7	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
130	10	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
131	8	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
132	1	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
133	2	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
134	1	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
135	9	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
136	1	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50
137	10	0.7592	0.4114	0.2572	0.3993	0.1778	0.2196	0.5246	51.20	0.50	0.50

ANEXO C

“EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS”

Zona de extracción 1

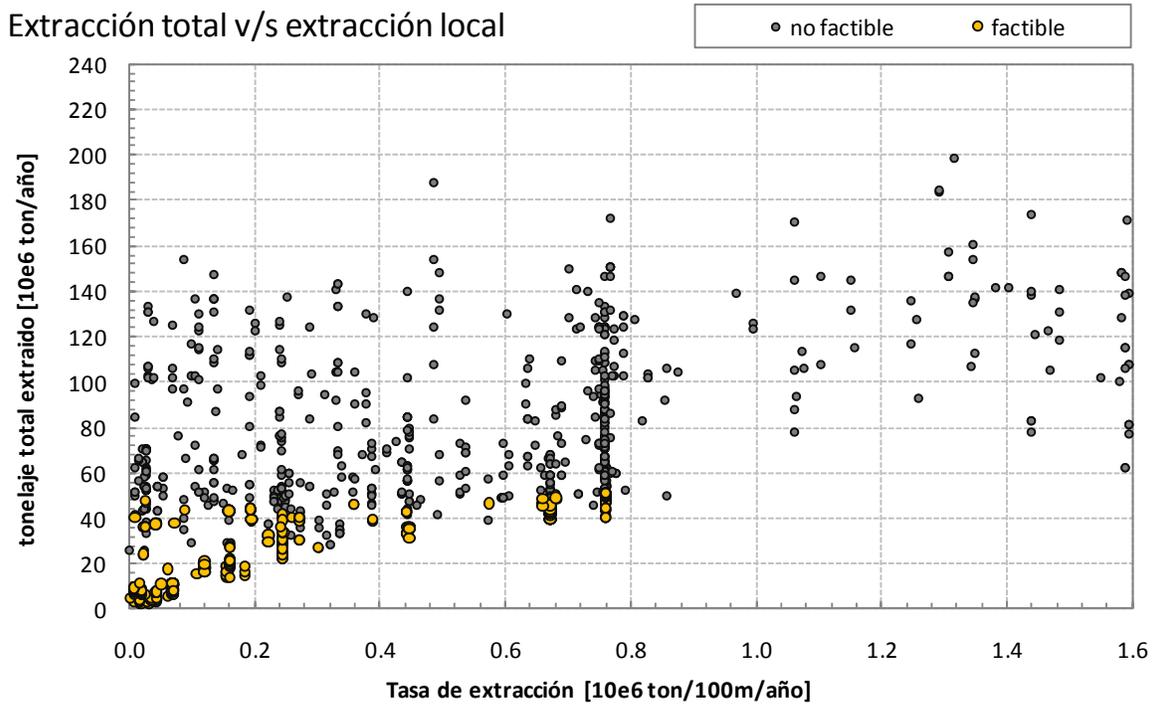


Figura C.1 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción
Zona de extracción 1.

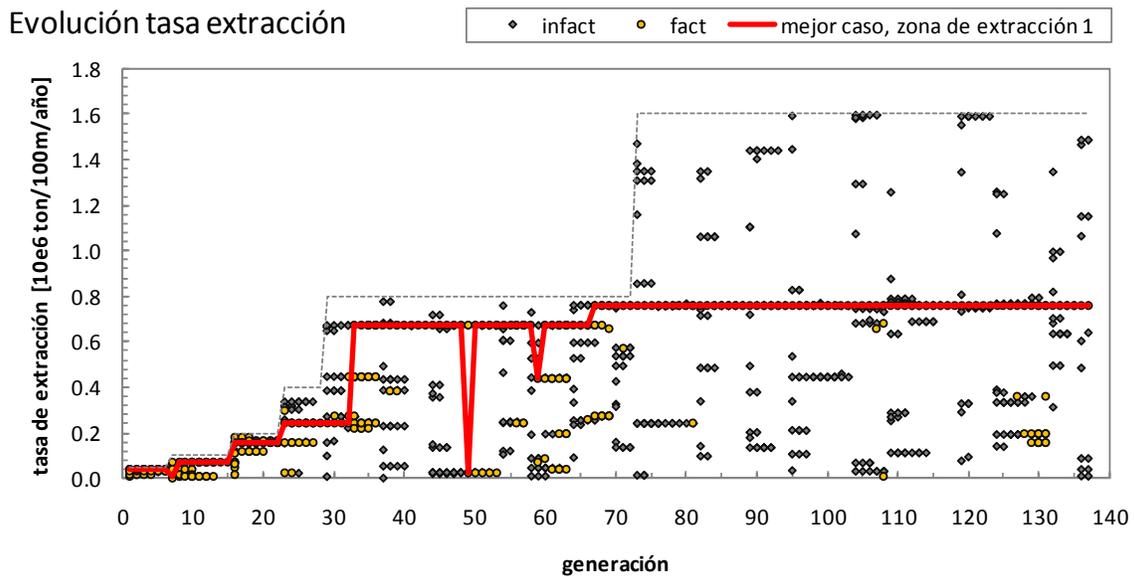


Figura C.2 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 1” v/s generación.

Zona de extracción 2

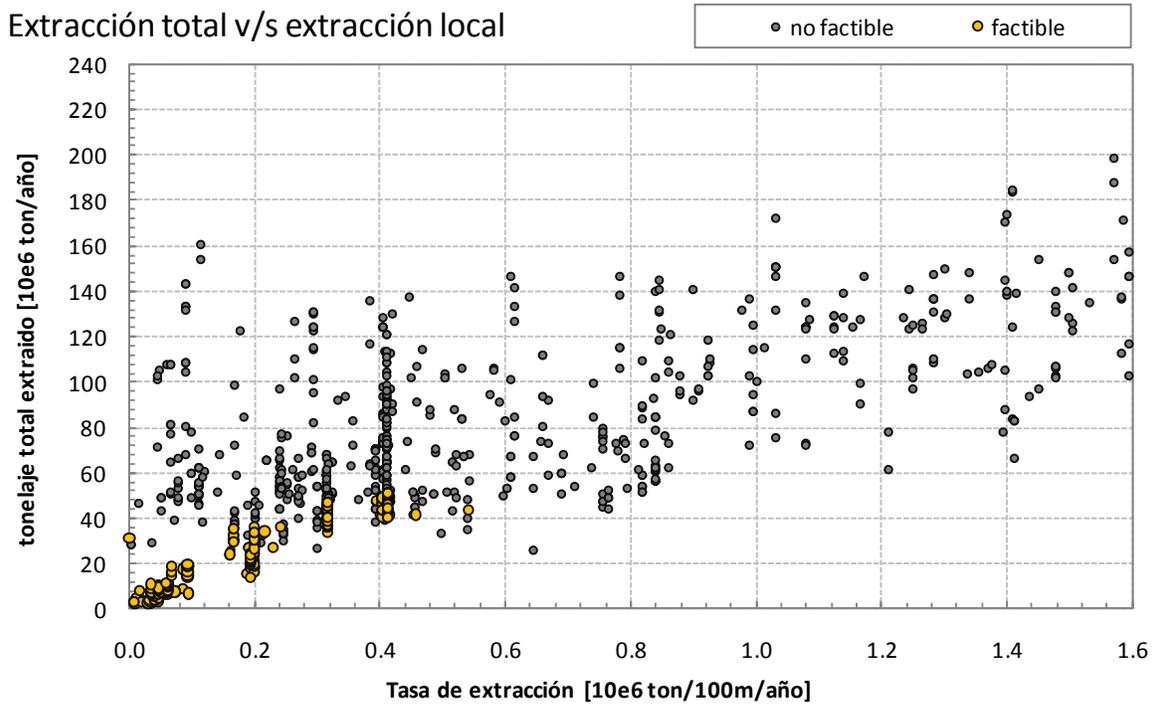


Figura C.3 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción
Zona de extracción 2.

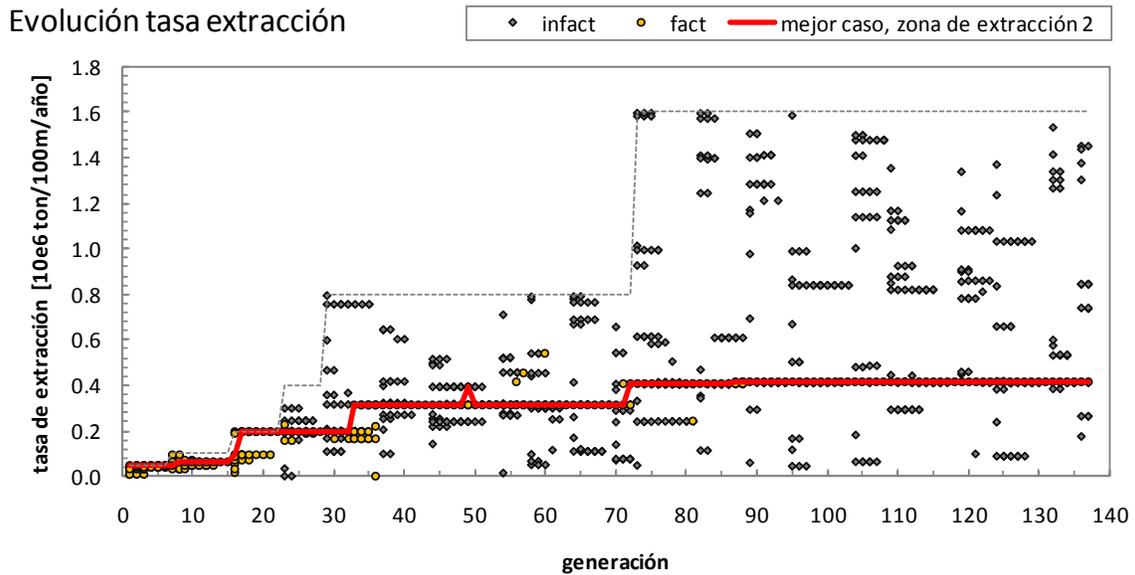


Figura C.4 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 2” v/s generación.

Zona de extracción 3

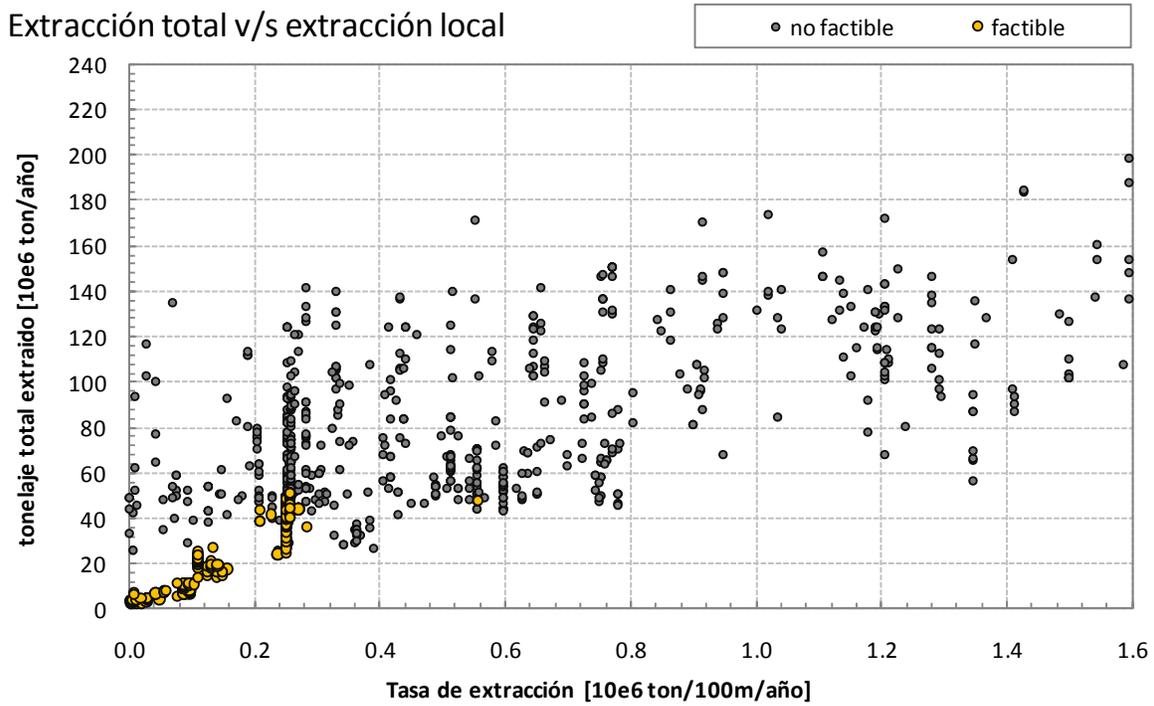


Figura C.5 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 3.

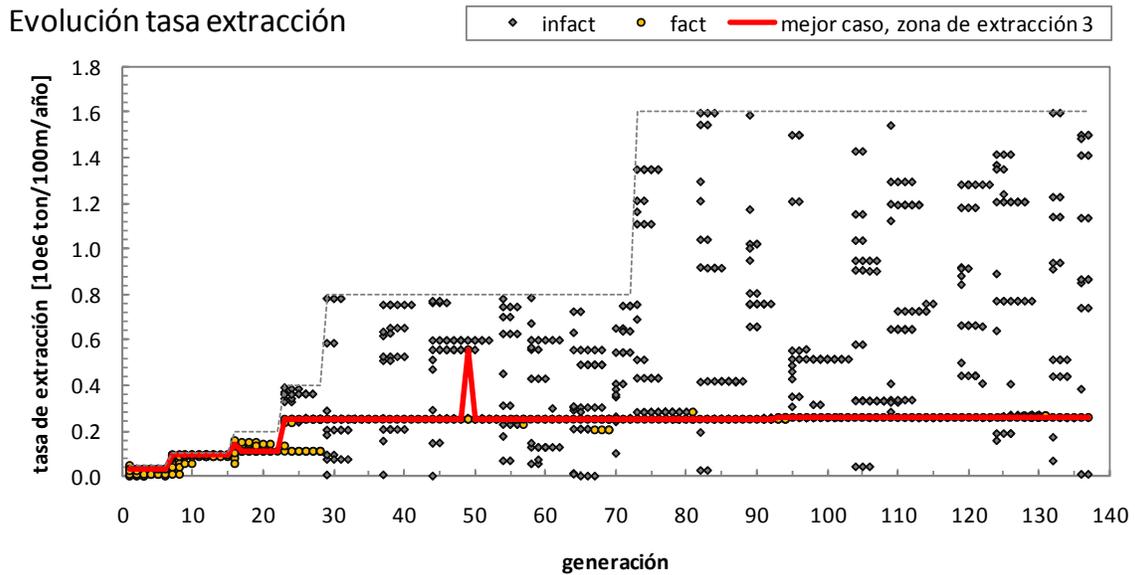


Figura C.6 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 3” v/s generación.

Zona de extracción 4

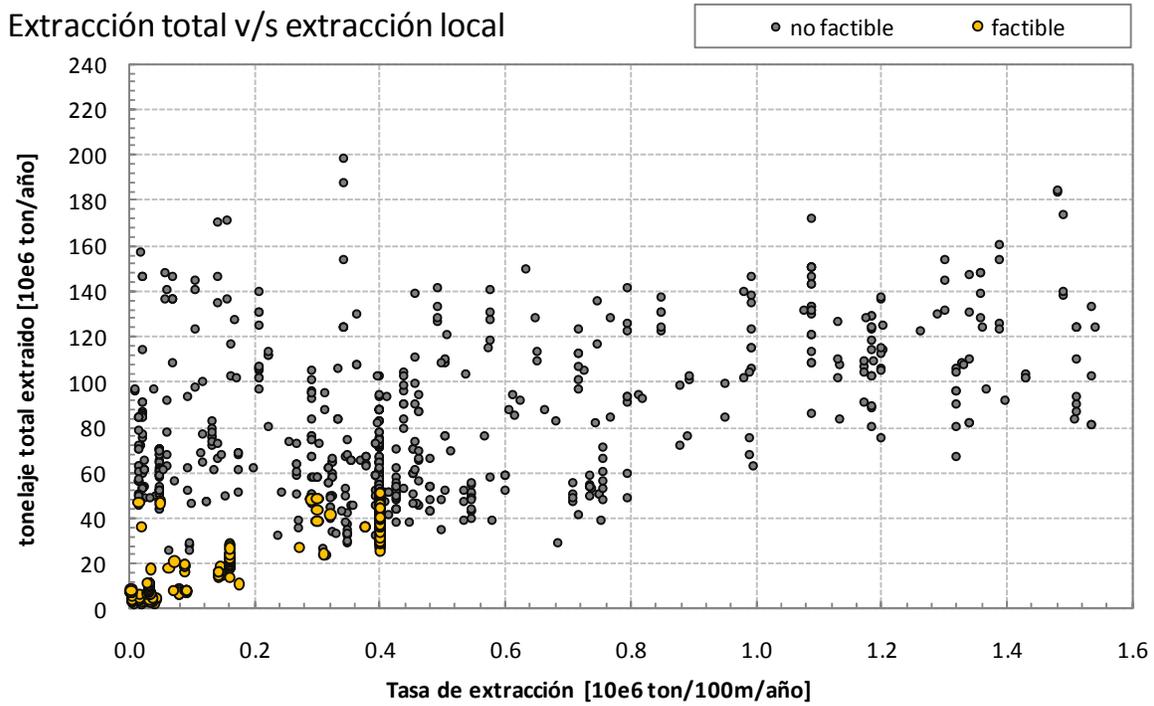


Figura C.7 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 4.

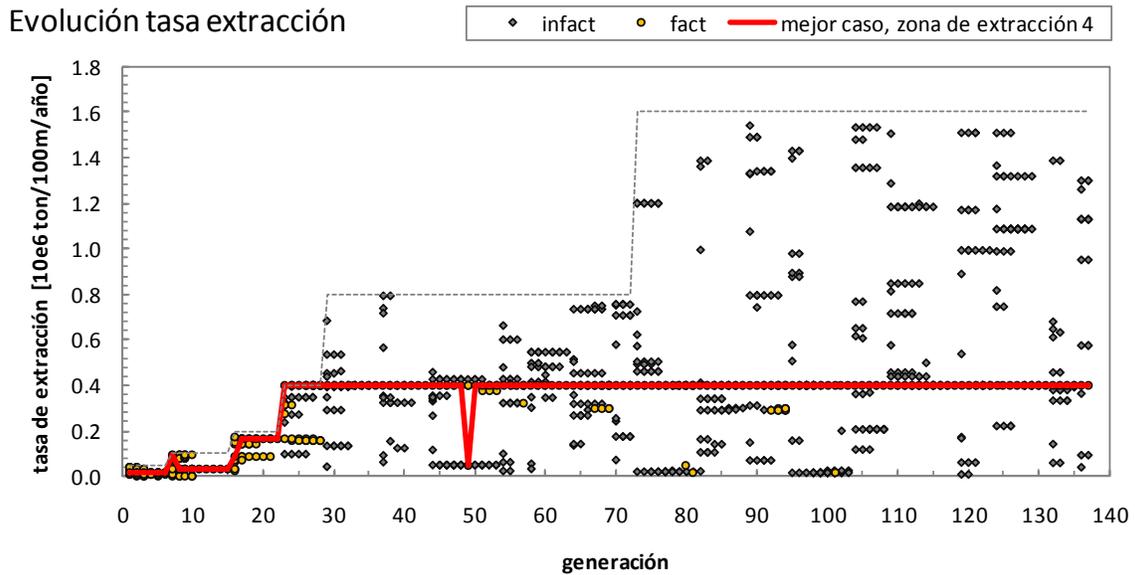


Figura C.8 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 4” v/s generación.

Zona de extracción 5

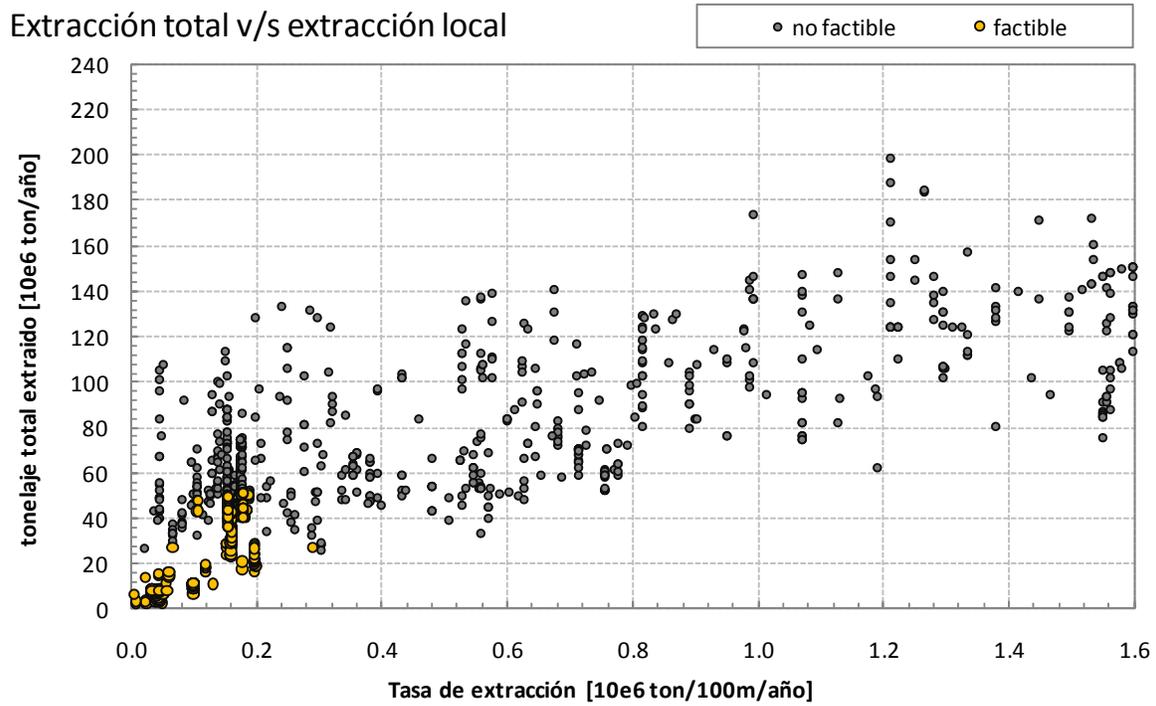


Figura C.9 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 5.

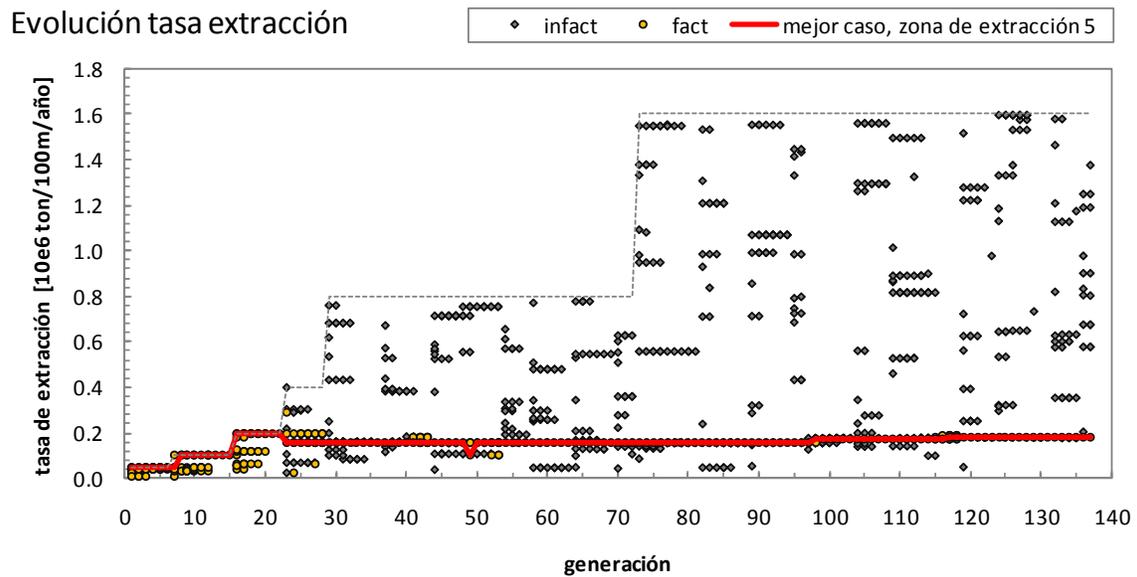


Figura C.10 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 5” v/s generación.

Zona de extracción 6

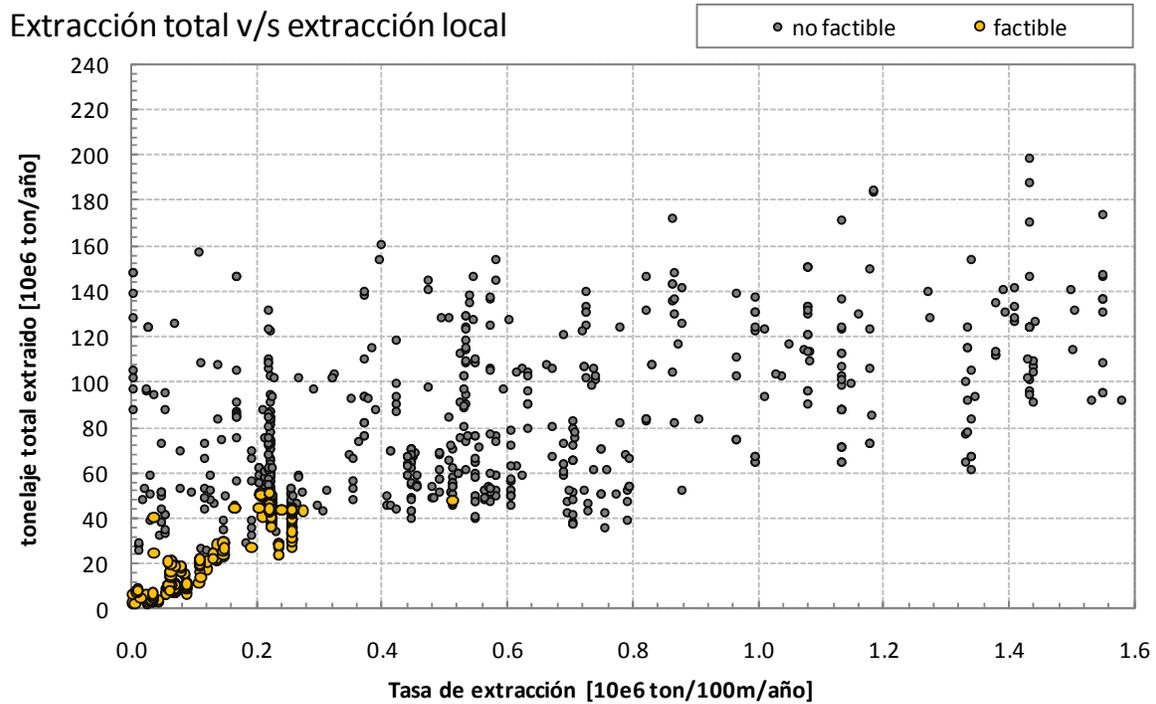


Figura C.11 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 6.

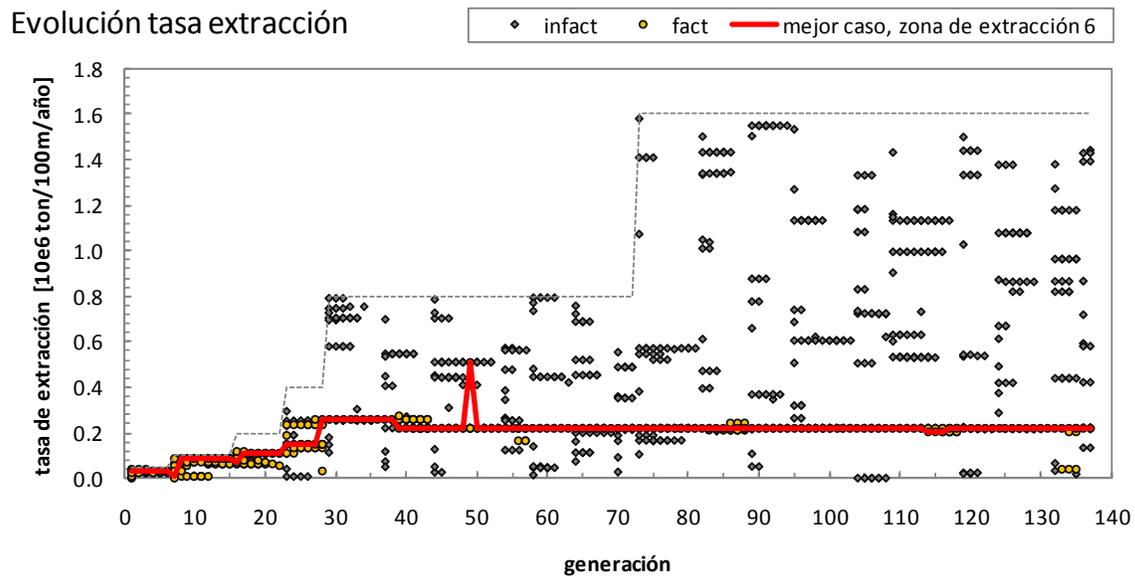


Figura C.12 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 6” v/s generación.

Zona de extracción 7

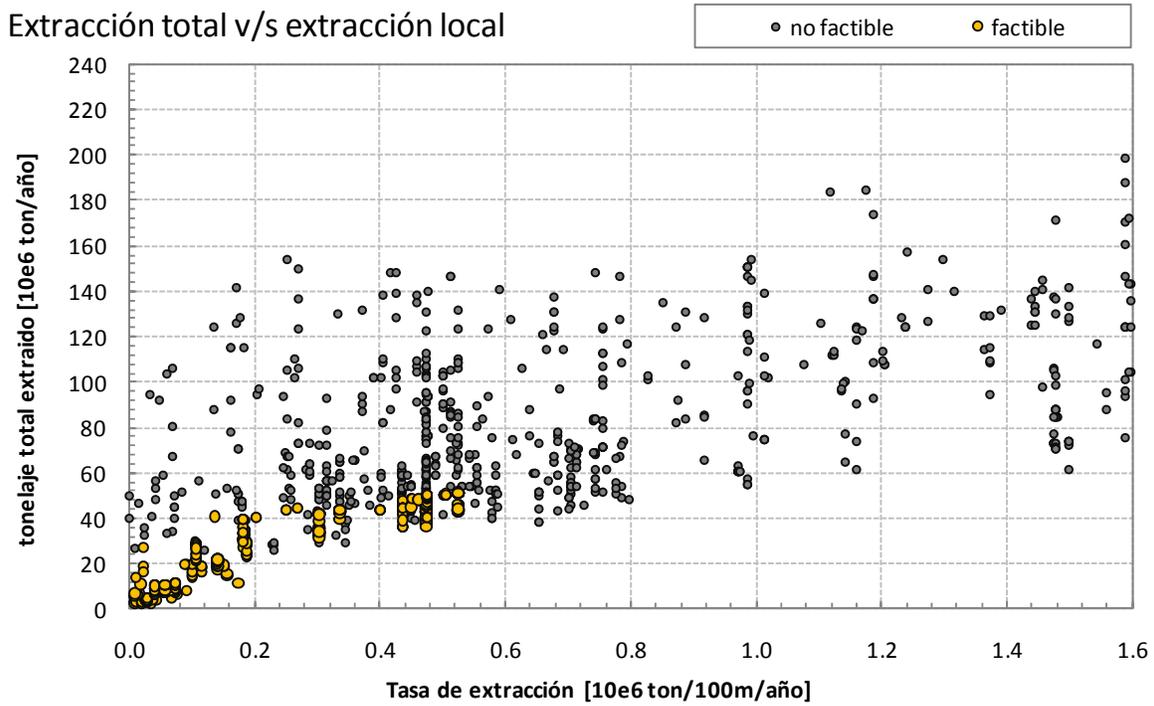


Figura C.13 Casos ejecutados: “función objetivo” v/s Tasas de extracción Zona de extracción 7.

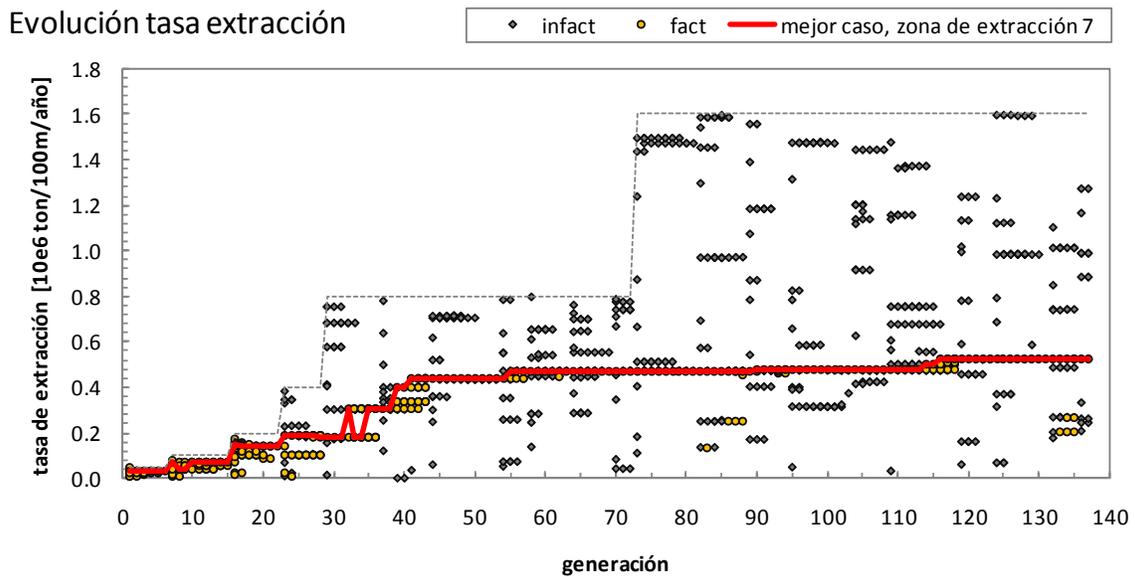


Figura C.14 Evolución: “Tasas de extracción en zona de extracción 7” v/s generación.