



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

MODELO DE PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS HIDRÁULICOS DE RIEGO,
A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

NATALIA ANDREA VALDIVIA SALINAS

PROFESOR GUÍA:
EDUARDO CONTRERAS VILLABLANCA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GERARDO DÍAZ RODENAS
MANUEL DÍAZ ROMERO

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Centro de Finanzas del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile.

SANTIAGO DE CHILE
AÑO 2014

PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS HIDRÁULICOS DE RIEGO, A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO

El presente estudio tiene por objetivo desarrollar e implementar una metodología de priorización de infraestructura hidráulica de riego, de forma que los proyectos de embalses sean estudiados y evaluados en su contexto.

Para la elaboración de la herramienta de priorización, se utilizó el método MCDM, el cual corresponde a un enfoque que permite comparar alternativas en base a múltiples atributos y características. Entre los métodos estudiados, se optó por la metodología AHP para determinar los ponderadores, ya que permite incluir, de forma simultánea, características cuantitativas y cualitativas dentro de un mismo modelo.

Se desarrolló un modelo con 5 niveles de criterios y subcriterios. En el primer nivel se especifica el objetivo del estudio. En el segundo nivel jerárquico, se consideran los criterios *macro*, los cuales corresponden a factores de desarrollo y estratégicos. Los criterios de desarrollo están asociados directamente con las características de los proyectos en sí y los criterios estratégicos corresponden a aspectos políticos y administrativos. En el tercer nivel se identifican los factores económico, social y ambiental. El subcriterio económico busca medir las rentabilidades y riesgos del modelo, el subcriterio social incluye los impactos que este tipo de obras tienen sobre las comunidades y el subcriterio ambiental buscar medir el impacto que tienen los embalses en el territorio donde estos se localizan.

Este modelo fue aplicado en cuatro proyectos de embalses, a través del cual se obtuvo un Índice Multi-Criterio (IMC), donde a mayor IMC, mayor prioridad tiene el proyecto. Los resultados obtenidos son: en primer lugar el Embalse A, seguido del Embalse C, luego se encuentra el Embalse B y, en último lugar se encuentra el Embalse D.

Los resultados muestran que los métodos multicriterio de priorización permiten incluir características cualitativas y cuantitativas de forma simultánea en un modelo. Sin embargo, es necesario perfeccionar este tipo de metodologías en aspectos tales como la selección de criterios, subcriterios e indicadores, de forma que los proyectos de embalses no sean sub o sobre valorados. Adicional a esto, para la correcta aplicación de la metodología multicriterio, es necesario disponer de información actualizada tanto de los proyectos, como de las comunidades y territorio donde estos se localizan.

Esta memoria está dedicada a mi familia, con todo mi amor.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme fuerzas y guiarme durante toda mi vida. Sin Él nada de esto hubiese sido posible.

A mis padres maravillosos, por las oportunidades, apoyo y soporte que me han brindado a lo largo de estos años. Gracias por la sabiduría y los buenos consejos. Gracias por los gratos momentos, por el tiempo y dedicación en nosotros, sus hijos. Los amo.

A mis hermanos, Cristian, Carla, Daniela y Diego, por los buenos momentos, los días de películas y los ratos agradables que disfrutamos juntos. Gracias por las enseñanzas que de una u otra manera, han sido fundamentales en mi formación. Los adoro.

A mi sobrino maravilloso, Vicente, que siempre brinda alegría y sonrisas por donde pasa.

A mis amigos, quienes me han acompañado durante todos estos años. Gracias por las risas, los viajes, los carretes y los momentos que hemos disfrutado juntos. Los quiero mucho.

A todos los tutores y a Karen, con quienes trabajé durante estos cuatro años en el DII. Gracias por los gratos momentos, la buena onda y las enseñanzas que me han hecho crecer un montón como profesional.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos y experiencias con nosotros. En especial a mi profesor guía, Eduardo Contreras, quien me ayudó y guió durante todo este proceso. También agradezco a mis profesores del curso Trabajo de Título, Gerardo, Manuel y Raúl, por toda la ayuda, consejos y apoyo que me brindaron durante este semestre.

Al equipo consultor a cargo del estudio. Gracias por su ayuda y colaboración durante el proyecto, en especial gracias a Maricel, Marcelo, Loreto y Fernando.

Al Centro de Finanzas, por haber financiado mi proyecto de memoria, muchas gracias.

Con cariño, gracias a todos los que estuvieron conmigo durante este proceso. Estoy feliz de que hayan sido parte de mi vida y los recordaré siempre con mucho afecto.

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Exposición del Tema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Metodología	3
1.4. Alcances	5
Capítulo 2: Marco conceptual.....	7
2.1. MCDM: Multi-Criteria Decision Making	7
2.1.1. Métodos de determinación de ponderadores en análisis multicriterio....	9
2.1.2. Métodos de agregación en modelos de decisión multicriterio.....	13
2.2. Selección de métodos	14
2.2.1. Selección método de determinación de ponderadores	14
2.2.2. Selección método de agregación de datos	16
2.3. AHP: Analytic Hierarchy Process.....	17
2.2.1. Características generales del modelo	17
2.2.2. Ventajas del modelo	20
2.2.3. Procedimiento de aplicación	21
Capítulo 3: Tipología de Proyectos.....	24
3.1. Proyectos de infraestructura de riego.....	24
3.2. Descripción del proceso general de planificación y toma de decisiones.....	27
3.3. Metodología de Priorización de Embalses	29
3.4. Descripción embalses a considerar en el estudio.....	30
3.4.1. Embalse A	31
3.4.2. Embalse B	31
3.4.3. Embalse C	32
3.4.4. Embalse D.....	32
Capítulo 4: Modelo de Priorización.....	33
4.1. Descripción del modelo jerárquico	33
4.1.1. Criterios <i>macro</i> y primer nivel de subcriterios	33
4.1.2. Subcriterio social	34
4.1.3. Subcriterio económico.....	36

4.1.4.	Subcriterio ambiental	40
4.1.5.	Criterio estratégico	45
4.2.	Importancia relativa de los criterios	47
4.2.1.	Valoración relativa de criterios <i>macro</i>	48
4.2.2.	Valoración relativa de criterio estratégico	49
4.2.3.	Valoración relativa de criterio de desarrollo	49
4.2.4.	Valoración relativa de subcriterio ambiental	50
4.2.5.	Valoración relativa de subcriterio social	51
4.2.6.	Valoración relativa de subcriterio económico	51
4.2.7.	Estructura global de preferencias	53
Capítulo 5:	Resultados	56
5.1.	Consideraciones previas a la aplicación del modelo	56
5.1.1.	Subcriterios social	57
5.1.2.	Subcriterio económico	58
5.1.3.	Subcriterio ambiental	59
5.1.4.	Criterio estratégico	60
5.2.	Aplicación modelo de priorización a grandes obras de riego	61
5.2.1.	Resultados obtenidos para embalses en estudio	61
5.2.2.	Análisis de sensibilidad	63
Capítulo 6:	Conclusiones y recomendaciones	70
6.1.	Conclusiones	70
6.1.1.	Conclusiones específicas	71
6.2.	Recomendaciones y propuestas de mejoras	72
Capítulo 7:	Bibliografía	75
Capítulo 8:	Anexos	78
8.1.	Anexo A: Detalle documento "Proceso de Toma de Decisiones – Descripción y Análisis Crítico"	78
8.2.	Anexo B: Extracto informe "Mecanismos de Priorización"	79
8.3.	Anexo C: Descripción de subcriterios e indicadores ambientales	83
8.3.1.	Nivel de impacto en las etapas de construcción y operación	83
8.4.	Anexo D: Cálculo de ponderadores del modelo	86
8.4.1.	Compilado respuestas de expertos	86
8.4.2.	Cálculo de ponderadores y test de consistencia	88

8.5. Anexo E: Aplicación modelo a proyectos piloto	93
8.5.1. Información proyectos	93
8.5.2. Indicadores	94
8.5.3. Indicadores "más es mejor"	94
8.5.4. Indicadores normalizados	94
8.5.5. Indicadores ponderados	94

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Esquema jerárquico AHP.....	18
Ilustración 2: Ejemplo matriz comparaciones a pares.....	19
Ilustración 3: Distribución de usos del recurso hídrico.....	24
Ilustración 4: Proceso de preparación y evaluación de proyectos.....	26
Ilustración 5: Toma de decisiones en el ciclo de vida de un proyecto.....	29
Ilustración 6: Esquema jerárquico de criterios, primeros niveles.....	34
Ilustración 7: Esquema jerárquico subcriterio social.....	35
Ilustración 8: Esquema jerárquico subcriterio económico.....	36
Ilustración 9: Esquema jerárquico subcriterio ambiental.....	40
Ilustración 10: Esquema jerárquico criterio estratégico.....	45
Ilustración 11: Esquema jerárquico global.....	47
Ilustración 12: Árbol estructura global de preferencias.....	54
Ilustración 13: Gráfico de embalses priorizados a través de modelo (IMC).....	62
Ilustración 14: Modelo original - Criterios <i>macro</i>.....	63
Ilustración 15: Análisis de Sensibilidad 1 - Criterios <i>macro</i>.....	64
Ilustración 16: Análisis de Sensibilidad 2 - Criterios <i>macro</i>.....	64
Ilustración 17: Análisis de Sensibilidad 3 - Criterios <i>macro</i>.....	65
Ilustración 18: Análisis de Sensibilidad 4 - Criterios <i>macro</i>.....	65
Ilustración 19: Modelo original - Criterios de Desarrollo.....	66
Ilustración 20: Análisis de Sensibilidad 1 - Subcriterio Económico.....	66
Ilustración 21: Análisis de Sensibilidad 2 - Subcriterio Económico.....	67
Ilustración 22: Análisis de Sensibilidad 1 - Subcriterio Social.....	67
Ilustración 23: Análisis de Sensibilidad 2 - Subcriterio Social.....	68
Ilustración 24: Análisis de Sensibilidad 1 - Subcriterio Ambiental.....	68
Ilustración 25: Análisis de Sensibilidad 2 - Subcriterio Ambiental.....	69

Índice de tablas

Tabla 1: Escala de importancias relativas según Thomas L. Saaty	19
Tabla 2: Índices aleatorios por tamaño de matriz	23
Tabla 3: Indicador de impacto ambiental, etapa de construcción	42
Tabla 4: Indicador de impacto ambiental, etapa de operación.....	43
Tabla 5: Valoración relativa de criterios <i>macro</i>	48
Tabla 6: Valoración relativa de criterio estratégico	49
Tabla 7: Valoración relativa de criterio de desarrollo	50
Tabla 8: Valoración relativa de subcriterio ambiental.....	50
Tabla 9: Valoración relativa de subcriterio social	51
Tabla 10: Valoración relativa de subcriterio económico.....	52
Tabla 11: Valoración relativa de subcriterio de sensibilidad del VAN Social.....	52
Tabla 12: Valoración relativa de subcriterio de riesgos en la gestión	53
Tabla 13: Datos proyectos de embalses, subcriterio social.....	57
Tabla 14: Datos proyectos de embalses, subcriterio económico	59
Tabla 15: Datos proyectos de embalses, subcriterio ambiental	60
Tabla 16: Datos proyectos de embalses, criterio estratégico.....	60
Tabla 17: Datos proyectos de embalses evaluados.....	61
Tabla 18: Priorización de embalses a través del modelo.....	62
Tabla 19: Priorización de embalses a través del VAN Social	63

Capítulo 1: Introducción

"Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow. The important thing is to not stop questioning."

— Albert Einstein, *Relativity: The Special and the General Theory*

1.1. Exposición del Tema

El Ministerio de Obras Públicas (MOP) es la institución del Estado encargada de planificar, construir y administrar infraestructura pública. El MOP realiza su labor a través de 3 entidades: Subsecretaría, Dirección General de Aguas y Dirección General de Obras Públicas. Esta última corresponde a la entidad encargada de articular la gestión técnica de los servicios de infraestructura y comprende seis unidades ejecutoras, entre las cuales se encuentra la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) [1].

La Dirección de Obras Hidráulicas del MOP tiene por misión *"proveer de servicios de Infraestructura Hidráulica que permitan el óptimo aprovechamiento del agua y la protección del territorio y de las personas"* [2].

En base a la misión de la institución, la DOH contempla entre sus objetivos el proveer de infraestructura de regadío que permita disponer del recurso hídrico. De esta forma, se busca incorporar nuevas áreas al riego y aumentar la seguridad de regadío de las localidades, incrementando así el potencial productivo del sector [2].

Dentro de las funciones de la DOH, una de las principales actividades que se deben realizar es la de planificar la infraestructura hídrica del país, esto con motivo de realizar una distribución equitativa de los recursos disponibles, beneficiar a todas las regiones por igual y hacer uso eficiente del capital.

El proceso de toma de decisiones respecto de la inversión de infraestructura hidráulica cuenta con restricciones presupuestarias, ya que no hay recursos suficientes para realizar todos los proyectos de regadío de forma simultánea. Adicional a esto, se debe tener en consideración que en la DOH no sólo recae la tarea de proveer de infraestructura de regadío, sino que también debe proveer de infraestructura para la evacuación y drenaje de aguas lluvias, para la protección de riberas de cauces naturales contra crecidas y para el abastecimiento de agua potable a las localidades rurales

[2]. Además, hay gran cantidad de actores e instituciones involucradas, lo cual dificulta aún más el proceso de toma de decisiones.

Es por este motivo que se realizaron diversas entrevistas a actores relevantes¹ de las diversas instituciones involucradas en el proceso, donde se detectaron una serie de problemáticas.

Se observa que existe una débil unión entre el análisis de inversiones, los procesos presupuestarios y los procesos de planificación estratégica sectorial. En general, no hay comunicación ni alineación entre las entidades, lo cual dificulta el flujo del proceso. Adicional a esto, se detecta que la evaluación económica se realiza de forma individual no integrada, sin consideraciones de equidad ni desarrollo territorial. Otro aspecto importante de considerar es el hecho de que la priorización de proyectos responde a ponderaciones subjetivas, tales como criterios profesionales y experiencias previas, no estandarizadas. Finalmente, la ejecución de una cartera de proyectos depende exclusivamente de una evaluación económica individual, esto implica que dicha cartera, con sentido de desarrollo y equidad territorial, puede no ser ejecutable en la práctica.

En base a las problemáticas anteriormente planteadas se diagnostica la necesidad de desarrollar una herramienta de gestión, que contribuya a mejorar el proceso de pre-inversión de la infraestructura hidráulica en el país.

A través de esta herramienta se desea facilitar la priorización de iniciativas de inversión desde las primeras etapas de pre-inversión, hasta las etapas de factibilidad y diseño de los proyectos y programas de la DOH. Adicional a esto, se busca priorizar carteras de proyectos de forma que las obras sean estudiadas y evaluadas en su contexto.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Construir un modelo de evaluación de proyectos a través de técnicas multicriterio, que permita priorizar los proyectos hidráulicos de riego a nivel nacional, posterior a su envío al Ministerio de Desarrollo Social (MDS)². Lo

¹ La lista de entrevistados se encuentra detallada en el documento "Proceso de Toma de Decisiones – Descripción y Análisis Crítico" elaborado por el equipo consultor a cargo del proyecto. Para más detalles del documento revisar Anexo A.

² El Ministerio de Desarrollo Social (MDS) es la institución encargada de velar por el desarrollo social del país. Dicha labor la lleva a cabo a través de su contribución en el diseño y aplicación de políticas, planes y programas en materia de desarrollo social, con principal foco en aquellas destinadas a erradicar la pobreza y brindar protección a las personas y/o grupos más vulnerables. Adicional a esto, entre sus labores se considera el velar por la coordinación, consistencia y coherencia de las políticas,

anterior con la finalidad de que los proyectos sean evaluados dentro de su contexto.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Determinar métodos actuales de aplicación de técnicas multicriterio en obras hidráulicas de riego, tanto en el país como en el extranjero.
2. Determinar las variables económicas, sociales, ambientales, políticas y administrativas de mayor incidencia en las grandes obras de riego.
3. Generar modelo de priorización para obras hidráulicas a nivel nacional, que apoye las decisiones de inversión.
4. Aplicar modelo propuesto a cuatro proyectos de embalses.
5. Comparar resultados obtenidos a través del modelo propuesto, con resultados obtenidos a través de metodología actualmente utilizada.

1.3. Metodología

En primer lugar, se recopilará información sobre las técnicas multicriterio que se están utilizando tanto en Chile como en el mundo. Para lograr esto, se revisarán diversos estudios y documentación publicada por los principales centros hídricos de Europa y Asia. Luego, se realizará un levantamiento de la información a nivel nacional, donde se revisarán los documentos públicos de instituciones como la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y la Comisión Nacional de Riego (CNR). Para complementar dicha información, se entrevistará a diversos expertos de las instituciones involucradas en el proceso de gestión del recurso hídrico, de forma de obtener el detalle de cómo se lleva a cabo el proceso en la práctica.

En segundo lugar, se realizará una investigación respecto de las variables comúnmente utilizada para la gestión y priorización del recurso hídrico. Para lograr esto, se analizarán diversos casos donde se haya realizado una priorización del recurso hídrico, de forma de identificar variables relevantes a considerar.

En tercer lugar, para la elaboración de la herramienta de priorización, se utilizarán técnicas multicriterio de evaluación de proyectos. Esto debido a que, según una investigación desarrollada respecto del uso de técnicas multicriterio en proyectos de priorización del agua, *“los métodos de decisión a través de técnicas multicriterio (MCDM) son una de las herramientas más ventajosas en la resolución de conflictos relacionados con la gestión del*

planes y programas a nivel nacional y regional. Asimismo, debe evaluar los estudios de pre-inversión de aquellos proyectos que solicitan financiamiento del Estado para determinar su rentabilidad social, de manera que respondan a las estrategias y políticas de crecimiento que se determinen en el país. Todo lo anterior con motivo de promover la movilidad e integración social [35].

recurso hídrico" [6]. Adicional a esto, el MCDM es una herramienta bastante útil para la comunicación entre los tomadores de decisión y aquellas personas afectadas por estas decisiones. Finalmente, los métodos multicriterio incluyen los efectos de la incertidumbre a los procesos de toma de decisión, los cuales ocurren con bastante frecuencia en planes de gestión del recurso hídrico [6].

A continuación, se detallan los pasos a considerar en el análisis multicriterio.

Pasos del MCDM [7], [8], [9]:

1. Describir formas actuales de evaluación y priorización de proyectos: Como etapa inicial del modelo, se identificarán y describirán las metodologías actualmente utilizadas para priorizar proyectos de riego. Para obtener esta información, se estudiarán tanto casos nacionales como internacionales.
2. Identificar criterios y objetivos: En esta etapa se identificarán aquellos criterios a ser incluidos en el modelo, donde se agruparán de acuerdo a características económicas, sociales y ambientales. Luego de determinados e identificados los criterios a considerar, serán jerarquizados en grupos de acuerdo al nivel de importancia relativa. Es relevante considerar que los criterios propuestos estén alineados con los objetivos del proyecto, para lo cual se debe tener en cuenta: viabilidad técnica, eficiencia económica, desarrollo y planes estratégicos del proyecto.
3. Determinar variables a considerar en el estudio de acuerdo a criterios previamente establecidos: Consiste en convertir las opciones identificadas a variables medibles (indicadores) y determinar las puntuaciones de cada una de estas opciones de acuerdo a los criterios previamente establecidos. Luego de identificadas las variables a incluir en el modelo, se debe chequear que los indicadores a través de los cuales se van a medir dichas variables, sean consistentes con los criterios, tanto económica, como social y ambientalmente.
4. Asignar ponderadores a cada variable de acuerdo a importancia relativa: En esta etapa se establecerá la metodología a utilizar para asignar ponderaciones a indicadores del modelo, de forma que estos reflejen la importancia de cada criterio.

Existen diversos métodos, subjetivos y objetivos, para llevar a cabo esta labor, entre los cuales se identifican: AHP, CRITIC y el Método de Entropía¹.

5. Combinar ponderaciones y calificaciones de cada opción de forma de obtener un valor global: En esta etapa se debe establecer que método de combinación se va a utilizar para agrupar los indicadores en un solo modelo. En problemas con alternativas de decisión discretas y limitadas, el método comúnmente utilizado corresponde al SAW².
6. Examinar resultados obtenidos: Se considera la etapa de evaluación de los resultados obtenidos a través del modelo global y un análisis de sensibilidad para verificar que efectivamente se cumplan con los requerimientos previamente establecidos.
7. Aplicación del modelo en proyectos piloto: Finalmente, se aplicará el modelo propuesto a cuatro embalses de forma de obtener una lista priorizada de dichos proyectos y así poder testear la herramienta.

En cuarto lugar, se realizará una comparación de la lista de proyectos de riego priorizada a través de la herramienta propuesta, con los resultados obtenidos a través de la priorización de proyectos mediante VAN Social.

Finalmente, para obtener mayor detalle sobre la forma en que cada criterio influye en el modelo, se realizará un análisis de sensibilidad para aquellos casos de mayor relevancia. Para lograr esto, se modificarán los ponderadores de los criterios considerados y se analizarán aquellos casos donde un proyecto se mueve de lugar (sube o baja un puesto), de forma de poder observar cuanto debe variar cierto criterio para ver variaciones en la lista priorizada de proyectos.

1.4. Alcances

Para la etapa de levantamiento de información, se considerarán solo estudios respaldados por instituciones internacionales acreditadas, como son centros de investigación y universidades, en Europa y Asia.

Para el caso del levantamiento de información a nivel nacional, solo se considerarán los documentos nacionales publicados por instituciones del Estado de Chile (como son la CNR y la DOH). Adicional a esto, por motivos

¹ Metodologías especificada en ítem "Métodos de determinación de ponderadores en análisis multicriterio", en el capítulo Marco conceptual.

² Simple Additive Weighting (SAW), metodología especificada en ítem "Métodos de agregación en análisis multicriterio", en el capítulo Marco conceptual.

de tiempo y disponibilidad, solo se entrevistará a dos expertos de cada institución involucrada.

La construcción de la herramienta de priorización a través de técnicas multicriterio se considera sólo para el producto estratégico "obras de riego" de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). No se considerarán las obras hidráulicas de "aguas lluvias" ni "cauces fluviales".

Por motivos de disponibilidad de información, el presente estudio considera la aplicación del modelo en cuatro grandes obras de riego, las cuales se determinarán en base a las características del territorio donde se encuentran ubicadas. Estos embalses serán seleccionados una vez que la DOH haya aceptado los criterios e indicadores propuestos para el presente estudio.

Los criterios a considerar en el modelo serán definidos y evaluados en conjunto con un equipo de especialistas, debido a la relevancia que estos tienen en el modelo de priorización a través de técnicas multicriterio¹. Adicional a esto, por motivos de recursos, se tomarán en cuenta solo aquellos criterios e indicadores que tengan información disponible, de forma que la herramienta pueda ser replicable a otros proyectos sin necesidad de incurrir en gastos adicionales a los supuestos.

Finalmente, se considerarán sólo las etapas de levantamiento de la información, planteamiento y desarrollo del modelo de priorización. La posterior aplicación generalizada del modelo a todas las obras de riego, será realizada por miembros del equipo económico del proyecto en curso.

¹ Información especificada en ítem "Selección métodos de análisis multicriterio", en el capítulo Marco conceptual.

Capítulo 2: Marco conceptual

"If I have seen further than others, it is by standing upon the shoulders of giants."

-Isaac Newton

2.1. MCDM: Multi-Criteria Decision Making

Los métodos multicriterio corresponden a un enfoque y una serie de técnicas que tienen como propósito proveer un modo de comparación entre opciones. Estas metodologías se utilizan para apoyar al tomador de decisiones, de manera que sus decisiones sean consistentes con un marco de racionalidad adoptado [7].

El proceso de toma de decisiones implica la comparación entre alternativas sobre las cuales se puede optar, frente a cierta disyuntiva presente y objetivos previamente establecidos.

En general, varios autores clasifican el MCDM de la forma [8]:

1. Multi Attribute Decision Making (MADM): Proceso de toma de decisiones multi-atributo, donde existe un conjunto discreto, limitado y predefinido de alternativas de decisión.
2. Multiple Objective Decision Making (MODM): Proceso de toma de decisiones con múltiples objetivos, donde las variables de decisión deben ser determinadas a partir de un conjunto continuo e infinito de alternativas.

En el presente caso de estudio cuenta con un conjunto de alternativas discreto y finito, por lo cual el método a utilizar corresponde al proceso de toma de decisiones multi-atributo (MADM).

De forma generalizada, los métodos de decisión a través de técnicas multicriterio consideran las siguientes etapas [9]:

1. Establecer contexto de decisión.
 - a. Establecer objetivos del MCDM e identificar tomadores de decisiones y actores claves del problema.
 - b. Diseñar sistema social y técnico para llevar a cabo el MCDM.
 - c. Considerar contexto de evaluación.

2. Identificar opciones a ser evaluadas.
3. Identificar criterios y objetivos.
 - a. Identificar criterios para evaluar las consecuencias de cada opción.
 - b. Jerarquizar los criterios en *clusters* de acuerdo a nivel de importancia de cada uno de estos.
4. Determinar desempeño esperado de cada opción de acuerdo a criterios establecidos.
 - a. Definir resultados de cada opción.
 - b. Puntuación de las opciones de acuerdo a los criterios.
 - c. Chequear consistencia de las puntuaciones asignada a cada criterio.
5. Asignar ponderadores a cada criterio de acuerdo a importancia relativa.
6. Combinar ponderaciones y calificaciones de cada opción de forma de obtener un valor global.
 - a. Calcular puntuaciones totales ponderadas en cada nivel jerárquico.
 - b. Calcular puntuaciones totales ponderadas a nivel global.
7. Examinar resultados obtenidos.
8. Realizar análisis de sensibilidad.
 - a. Realizar análisis de sensibilidad para determinar si existen otras preferencias o ponderaciones que afecten el orden global de las opciones.
 - b. Determinar ventajas y desventajas de las opciones seleccionadas y comparar pares de opciones.
 - c. Crear nuevas opciones que puedan ser mejores que las opciones inicialmente consideradas.
 - d. Repetir pasos anteriores hasta que se cumpla algún requisito inicialmente determinado.

En esencia, la decisión a través de técnicas multicriterio es una optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un único agente tomador de decisiones.

2.1.1. Métodos de determinación de ponderadores en análisis multicriterio

AHP: Analytic Hierarchy Process

El proceso analítico jerárquico (AHP), es una metodología de análisis multicriterio desarrollada por el doctor en matemáticas, Thomas L. Saaty.

Este método requiere que el tomador de decisiones proporcione tanto evaluaciones como preferencias subjetivas con respecto a la importancia relativa de decisión para cada criterio. El resultado del AHP corresponde a una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada alternativa de decisión.

Dado que es el tomador de decisiones quien determina, mediante sus juicios de valor, conocimientos y experiencia previa, las ponderaciones de cada criterio en el modelo, el AHP es considerado como un *método subjetivo* [8].

Entre las principales ventajas del AHP se considera la posibilidad de incluir datos cualitativos que, generalmente, no se consideran en los análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero suelen ser relevantes en algunos casos [8].

El AHP posibilita organizar la información de manera eficiente y gráfica, lo cual permite que el problema pueda ser descompuesto y analizado por partes, para así visualizar de mejor manera los efectos de cambios en los distintos niveles [8].

El AHP *"se trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los sub-problemas en una conclusión"*¹.

Método de la Entropía

El término entropía es comúnmente definido como *"la medición de la incertidumbre asociada con los fenómenos aleatorios"*² y esta incertidumbre está representada, generalmente, por una distribución de probabilidad discreta.

El método de entropía se utiliza para calcular las ponderaciones de los distintos criterios asociados a la matriz de utilidades. Estos valores son independientes de los juicios de valor e intuiciones del tomador de

1. Thomas L. Saaty, "The Analytical Hierarchical Process", J. Wiley, New York, 1980.

2. Definición de entropía por C.E. Shannon y W. Weaver.

decisiones, por lo cual el método de la entropía es considerado como un *método objetivo* [8].

Esta técnica es particularmente útil para explorar contrastes entre grupos de datos. Estos conjuntos de datos se pueden asignar como un conjunto de soluciones alternativas en la matriz de utilidades, donde se evalúa cada alternativa de solución en términos de su resultado. La filosofía de este método se basa en la cantidad de información disponible y su relación con la importancia del criterio [8].

Si el valor de entropía es alta, la incertidumbre contenida en el vector es alta, la diversificación de la información es baja y, correspondientemente, el criterio es menos importante [8].

Una de las principales ventajas de este método es que reduce la carga al tomador de decisiones en problemas de gran complejidad. Adicional a esto, se puede utilizar como una solución de referencia en situaciones donde es complicado llegar a un consenso de forma grupal, ya que es a través del modelo que se realiza la estimación de los ponderadores de los criterios [8].

Modelo matemático [8]:

1. Para determinar los ponderadores a través del valor de la entropía (e_j), la matriz de decisión debe ser normalizada por la ecuación (1), obteniendo así una nueva matriz (ecuación 2) que contiene las ponderaciones relativas de las alternativas a través de los criterios.

$$r_{ij} = a_{ij} \left[\sum_{i=1}^n a_{ij} \right]^{-1}, \quad j=1,2, \dots, m. \quad (1)$$

Donde, a_{ij} son las alternativas de decisión.

$$R = \begin{bmatrix} [r_{11} & \dots & r_{1m}] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [r_{n1} & \dots & r_{nm}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

2. Para calcular los valores de las entropías (e_j), se utiliza la información contenida en la matriz R, a través de la ecuación (3).

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln r_{ij}, \quad j=1,2, \dots, m. \quad (3)$$

Donde,

$k = \frac{1}{\ln(n)}$, es una constante utilizada para garantizar que $0 \leq e_j \leq 1$.

3. Luego de calculadas las entropías, se establece el grado de divergencia (f_j) mediante la ecuación (4).

$$f_j = 1 - e_j \quad , j=1,2, \dots , m. \quad (4)$$

4. Como f_j es considerada la medida específica de intensidad de contraste natural del criterio c_j , entonces los ponderadores de los criterios pueden ser obtenidos a través de normalización activa (ecuación 5).

$$w_j = f_j \left[\sum_{j=1}^m f_j \right]^{-1} \quad , j=1,2, \dots , m. \quad (5)$$

CRITIC: Criteria Importance Through Intercriteria Correlation

El método CRITIC corresponde a una metodología utilizada en problemas de evaluación multicriterio y tiene por objetivo el determinar las ponderaciones de criterios de un problema según importancia relativa. En este método se utiliza el análisis de correlaciones para detectar contrastes entre criterios, de forma de identificar aquellos de mayor relevancia para el problema [10].

Las principales ventajas de este método es que las ponderaciones de los criterios son independientes de las intuiciones y conocimientos del tomador de decisiones, por lo cual es considerado como un *método objetivo* [8].

Modelo matemático [8]:

1. Para un conjunto A finito de n alternativas y para un sistemas de m criterios de evaluación dados (f_j), el problema multicriterio, en su formal general, está dado por la ecuación (1).

$$Max\{f_1(a), f_2(a), \dots, f_m(a) / a \in A\} \quad (1)$$

2. Para cada criterio f_j se define una función de pertenencia x_j , a través de las cuales se asignan los valores de f_j al intervalo [0, 1]. Entonces, el valor de x_{aj} , obtenido a través de la ecuación (2), representa el grado en que la alternativa a es cercana al valor ideal f_j^* (donde este

corresponde al mejor desempeño del criterio j) y es más lejana al valor anti-ideal f_{j^*} (el cual corresponde al peor desempeño del criterio j).

$$x_{aj} = \frac{f_j(a) - f_{j^*}}{f_j^* - f_{j^*}} \quad (2)$$

3. De esta forma, la matriz inicial de evaluación es transformada en una matriz de ponderaciones relativas, donde el elemento genérico es x_{ij} . Al examinar el j -ésimo criterio de forma individual, se genera el vector x_j , el cual denota todas las ponderaciones de las n alternativas consideradas inicialmente (ecuación 3).

$$x_j = (x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(n)) \quad (3)$$

4. Luego, se construye una matriz simétrica de dimensiones $m \times m$ y un elemento genérico r_{jk} , donde este elemento corresponde al coeficiente de correlación lineal entre los vectores x_j y x_k . De esta forma, la suma representada en la ecuación (4) corresponde a la medida del conflicto generado por el criterio j con respecto a la situación de decisión definida por el resto de los criterios.

$$\sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad (4)$$

5. A través de la ecuación (5) se obtiene el valor c_j , el cual corresponde a la cantidad de información que brinda al modelo el j -ésimo criterio.

$$c_j = \sigma_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad (5)$$

donde, σ_j es la desviación estándar

A mayor valor de c_j , mayor será la cantidad de información transmitida por el criterio correspondiente y, por lo tanto, mayor será su importancia relativa en el modelo para el proceso de toma de decisión.

6. El valor objetivo de ponderación de cada criterio (w_j), se obtiene mediante la normalización de estos valores a través de la ecuación (6).

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{k=1}^m c_k} \quad (6)$$

2.1.2. Métodos de agregación en modelos de decisión multicriterio

SAW: Simple Additive Weighting

El método de ponderación aditiva simple (SAW), también conocido como método de combinación o puntuación lineal ponderada, es una técnica de decisión multicriterio y se basa en el promedio ponderado. Corresponde a uno de los métodos más simples y se utiliza muy a menudo en métodos de decisión multi-atributo con número finito y discreto de alternativas de decisión [11].

La ventaja de este método es que corresponde a una transformación lineal proporcional de los datos en bruto, lo cual significa que el orden relativo de magnitud de las ponderaciones estandarizadas sigue siendo el mismo [11].

Modelo matemático [8]:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\max(a_{ij})} \quad u_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} w_j$$

1. Se normaliza cada criterio j , para luego transformar los valores de rendimiento en una escala valorizable entre 0 y 1, donde 1 representa el mejor rendimiento posible.
2. Luego, se selecciona la alternativa en base a la utilidad u_i
3. En caso de que se utilice un criterio de minimización de costos, los valores más bajos son mejores. En estos casos, para el proceso de normalización se debe utilizar el valor recíproco de a_{ij} ($1/a_{ij}$).
4. En caso de que se utilice un criterio de maximización de utilidades, los mayores valores de la utilidad (u_i) son las mejores alternativas.

CP: Compromise Programming

Entre las diversas técnicas de decisión multicriterio existentes, se puede identificar el método CP, el cual se utiliza para la toma de decisiones

en MCDM de forma realista y sin necesidad de depender de los supuestos de las teorías tradicionales de utilidad [9].

La idea central del CP es identificar una solución óptima de acuerdo a su proximidad al llamado "punto ideal", el cual debe ser definido previamente. La mejor alternativa, de un conjunto de soluciones eficientes, corresponde a aquella que se encuentra ubicada a la menor distancia del "punto ideal" [18].

Modelo matemático:

$$L_i = \left[\sum_{j=1}^m w_j^p \left| \frac{\max a_{i,j} - a_{i,j}}{\max a_{i,j} - \min a_{i,j}} \right|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

1. En los modelos CP, se utiliza la métrica de distancias determinada por L_i (ecuación 1).
2. El parámetro p se utiliza para expresar de forma implícita la intención del tomador de decisión, donde:
 - a. Si p toma valor 1 ($p=1$), se desea equilibrar los criterios.
 - b. Si p toma valores mayores que 1 ($p>1$), se está aceptando la disminución de utilidad marginal.
 - c. Si p toma valores infinitos ($p=\infty$), se están buscando soluciones absolutamente dominantes.
3. El valor más común es $p=2$, el cual implica que las distancias más grandes a la solución ideal son penalizadas más que aquellas distancias más cercanas.
4. La alternativa con el mínimo L_i se considera como solución óptima.

2.2. Selección de métodos

A continuación se presentan los criterios de selección de métodos de análisis y de decisión multicriterio a utilizar durante el presente estudio.

2.2.1. Selección método de determinación de ponderadores

Los métodos de análisis multicriterio son utilizados para determinar los ponderadores de cada criterio dentro del modelo. Para el presente proyecto, se estudiaron tres metodologías para determinar ponderadores, las cuales son:

1. AHP: Analytic Hierarchy Process
2. CRITIC: Criteria Importance Through Intercriteria Correlation
3. Método de la Entropía

Durante el presente año se realizó un taller sobre “Mecanismos de Priorización” donde participaron expertos extranjeros, el Banco Mundial, Gobierno de Chile y el equipo consultor a cargo del proyecto¹. Según lo planteado en el taller por los expertos internacionales, la metodología a desarrollar para la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), debe ser consistente con la metodología actualmente utilizada por DIRPLAN², la cual corresponde al método AHP. También, se plantea por parte de los consultores que al ser el objetivo generar un modelo de priorización que de cuenta de los intereses de distintas autoridades dentro del proceso de toma de decisión, es recomendable la alternativa de AHP, ya que esta herramienta permite incorporar las visiones subjetivas de cada uno de estos tomadores de decisión.

Adicional a esto, un aspecto importante a considerar, es el hecho de que la gestión de los recursos hídricos involucra a varios grupos e instituciones, con diversos objetivos, responsabilidades e intereses, por lo cual es imprescindible que la metodología a utilizar considere múltiples tomadores de decisiones de forma simultánea [16].

Además, se debe considerar que dada la complejidad y la poca estructura que existe en las negociaciones de la gestión hídrica, es necesario considerar aspectos difíciles de cuantificar en los modelos de toma de decisiones. Por lo cual, se necesita una metodología flexible capaz de combinar variables cualitativas y cuantitativas en el mismo modelo, de forma de incluir componentes tangibles e intangibles de forma simultánea [16].

Finalmente, se debe tener en consideración que, según una investigación realizada sobre diversos métodos multicriterio utilizados para resolver problemas de gestión hídrica por la organización “Evolving Water Management”, el aspecto más importante a considerar en la aplicación de la metodología multicriterio es la selección de criterios y opciones de decisión [17]. La decisión sobre la mejor alternativa es, básicamente, independiente del método multicriterio utilizado, pero es significativamente sensible a los criterios considerados, ponderadores asignados y datos utilizados [19].

¹ Ver detalles en Anexo B.

² DIRPLAN: Dirección de Planeamiento, Ministerio de Obras Públicas. DIRPLAN corresponde a la instancia asesora estratégica del MOP en materias de planificación, definición de políticas, coordinación general y priorización de planes de estudios, proyectos y ejecución de las obras. Todo lo anterior según las necesidades del país, los programas gubernamentales y los objetivos de los distintos Servicios y Unidades que comprende el quehacer ministerial.

De las tres técnicas propuestas, el método que mejor cumple con los objetivos de la gestión de recursos hídricos para el presente proyecto, corresponde al AHP.

2.2.2. Selección método de agregación de datos

Los métodos de decisión son utilizados para conectar los criterios y ponderadores previamente definidos, en un único modelo. Entre los métodos de decisión multicriterio existentes, se estudiaron las siguientes opciones:

1. SAW: Simple Additive Weighting
2. CP: Compromise Programming

Según un estudio realizado por el Departamento de Computación y Ciencias de la Información de la Universidad de Pensilvania, el método SAW es el método más robusto y el dominante en términos de costo-beneficio [22].

La metodología Compromise Programming (CP) corresponde a un método de decisión para problemas complejos y, generalmente, es utilizado como técnica de decisión multicriterio en problemas con infinitas soluciones [20].

Adicional a esto, según una investigación realizada por la Sociedad de Investigación Operacional Británica, el método CP es difícil de utilizar en problemas reales. Entre las dificultades de llevar este método a la práctica, se identifican [21]:

- Para la implementación del CP se requiere identificar un "punto ideal" con el cual comparar la solución óptima obtenida a través del método. En la práctica, es extremadamente difícil encontrar un único punto ideal.
- En algunos casos, las iteraciones del modelo pueden no llegar a una solución óptima, lo cual provoca ciclos perpetuos (generalmente ocurre en casos con múltiples soluciones óptimas).

Por las razones antes expuestas, se opta por el uso de la metodología SAW y se descarta el uso de la técnica de decisión Compromise Programming (CP).

2.3. AHP: Analytic Hierarchy Process

2.2.1. Características generales del modelo

El AHP corresponde a un proceso de "racionalidad sistemática", ya que permite ver el problema como un todo y estudiar las interacciones de cada componente de forma simultánea [13].

Esta metodología incorpora juicios y valores personales de manera lógica, de forma de incorporar imaginación, experiencias, conocimientos, lógica e intuición en la estructura de jerarquías del problema. El AHP nos muestra una forma de conectar elementos de diversas partes del problema para obtener una única solución. Para lograr esto, el modelo debe ser repetido de forma progresiva, donde cada iteración se comporta como un problema de testeo de hipótesis, de forma que la repetición progresiva de una hipótesis permita entender mejor el sistema [13].

El AHP incorpora todos los elementos del proceso de toma de decisiones y propone una metodología de ordenamiento del pensamiento analítico, de lo cual destacan tres pasos fundamentales [7]:

1. Construcción de jerarquías
2. Formulación de prioridades
3. Análisis de consistencia

Construcción de jerarquías

Los problemas complejos son comprendidos de mejor manera si son descompuestos en elementos constituyentes y analizados por fracciones. La construcción de jerarquías hace referencia a la desagregación del sistema en las partes que lo constituyen, para luego clasificar cada una de estos segmentos en niveles [13].

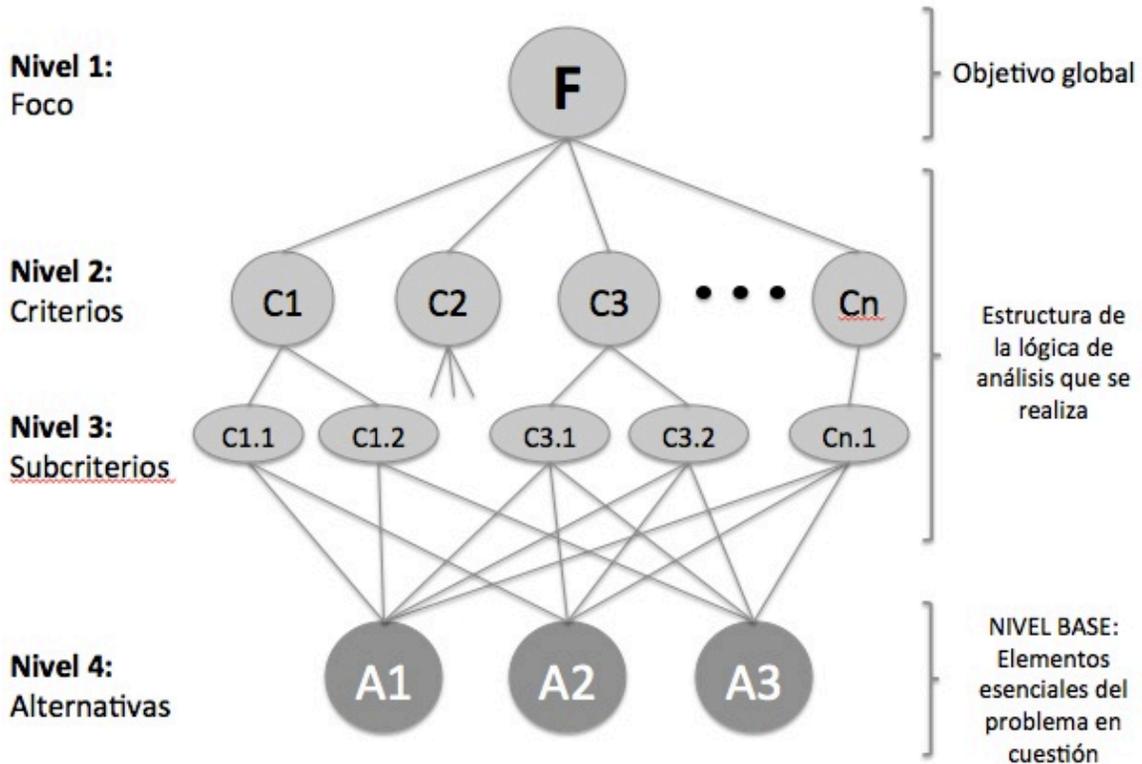
Los elementos deben agruparse en conjuntos homogéneos, de entre cinco y nueve máximo, de tal forma que puedan ser significativos en comparación con los elementos del nivel inmediatamente superior. La única restricción en la jerarquía es que cualquier elemento en un nivel debe ser posible relacionarlo con algún elemento del nivel inmediatamente superior. Este procedimiento se puede expresar de la siguiente forma [13]:

Como se puede observar en la ilustración 1, la red jerárquica comienza con un nodo llamado "Foco" y corresponde al objetivo global del problema. El segundo y tercer nivel contiene los criterios y subcriterios para la evaluación de las alternativas, los cuales pueden constar de diversos elementos, siempre y cuando sean del mismo orden de magnitud que el nivel anterior (esto debido a que en etapas posteriores del modelo, cada elemento debe ser comparado con otro en función de un criterio del nivel inmediatamente

superior). El último nodo corresponde a las alternativas consideradas en el problema en cuestión.

En caso de que la disparidad entre elementos sea demasiado grande, deben permanecer en el mismo nivel.

Ilustración 1: Esquema jerárquico AHP.



Fuente: Elaboración propia

Formulación de prioridades

Luego de construidas las jerarquías, es necesario establecer prioridades entre los elementos de la jerarquía. Para lograr esto, se propone una comparación a pares entre elementos del sistema con respecto del elemento de nivel superior de que dependen y, de esta forma, declarar la preferencia de uno sobre otro [13].

Las matrices de comparación suelen ser la forma más conveniente para esta etapa del proceso. Para comenzar con la comparación a pares, se comienza en la parte superior de la jerarquía y se selecciona uno de los criterios superiores, por ejemplo, criterio C. Luego, del nivel inmediatamente posterior, se toman los elementos a comparar: C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 . Dichos elementos deben ser organizados en una matriz tal como se muestra en la ilustración 2 [7].

Ilustración 2: Ejemplo matriz comparaciones a pares.

C	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	1				
C ₂		1			
C ₃			1		
C ₄				1	
C ₅					1

Fuente: Elaboración propia.

Luego de elaboradas las matrices, el cálculo de prioridades se resume como un problema de valores y vectores propios, donde el vector propio asociado al mayor valor propio de cada matriz representa el orden de prioridad y donde el mayor valor propio, antes mencionado, corresponde a una medida de la consistencia del juicio [7].

Como forma de ordenar los juicios y dar un ordenamiento lógico a la comparación, Thomas L. Saaty propone una escala predefinida para llevar a cabo esta labor. En la Tabla 1 se describen las intensidades de importancia establecidas por el autor para la comparación a pares. Cabe destacar que el método es independiente de la escala y esta tabla corresponde sólo a una propuesta.

Tabla 1: Escala de importancias relativas según Thomas L. Saaty

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Débil importancia de un criterio sobre el otro	Experiencia y juicio favorecen ligeramente a una actividad por sobre otra
5	Importancia esencial o fuerte	Experiencia y juicio favorece robustamente a una actividad por sobre otra
7	Importancia demostrada	Una actividad es robustamente favorecida y su dominancia está demostrada en la práctica
9	Importancia absoluta	La evidencia que favorece una actividad por sobre otra es del más alto nivel
2,4,6,8	Valores intermedios entre los juicios adyacentes	En caso que se necesite
Inversos de los números no nulos de arriba	Si la actividad i tiene asignada uno de los números no nulos de arriba cuando es comparada con j, entonces j tiene valor inverso en comparación con i.	

Fuente: Thomas L. Saaty, "Decision Making for Leaders: The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World".

Análisis de consistencia

Posterior a la formulación de prioridades, es necesario un análisis de consistencia de forma de verificar que se cumplan los principios de transitividad y proporcionalidad.

La consistencia tiene relación con el grado de dispersión de los juicios del tomador de decisiones. Los juicios consistentes imponen 2 propiedades en forma simultánea:

1. Transitividad: Si A es mejor que B y B es mejor que la C entonces se espera que A sea mejor que C.
2. Proporcionalidad: Si A es 3 veces mejor que B y B es 2 veces mejor que C entonces se espera que A sea 6 veces mejor que C.

Por supuesto, es necesario, cierto grado de consistencia en la fijación de prioridades para los elementos o actividades con respecto de algún criterio para obtener resultados válidos en el mundo real.

El AHP mide la inconsistencia global de los juicios mediante la Proporción de Consistencia, que es el resultado de la relación entre el Índice de Consistencia y el Índice Aleatorio. El Índice de Consistencia es una medida de la desviación de consistencia de la matriz de comparaciones a pares y el Índice Aleatorio es el índice de consistencia de una matriz recíproca aleatoria, con recíprocos forzados, del mismo rango de escala.

2.2.2. Ventajas del modelo

Entre las ventajas del modelo AHP, para el presente caso de estudio, se consideran las siguientes [13]:

- Unidad: Provee un único modelo, flexible y fácil de entender, para una amplia gama de problemas no estructurados.
- Complejidad: Integra deducción y enfoque de sistemas en la resolución de problemas complejos.
- Iteración del proceso: Permite redefinir las aristas de un problema, y mejorar su juicio y entendimiento a través de la repetición.
- Estructura Jerárquica: Refleja la tendencia natural de la mente para segmentar los elementos de un sistema en distintos niveles de acuerdo a su importancia relativa.
- Interdependencia: No es necesario un pensamiento lineal, esta metodología permite incluir dentro del modelo elementos interdependientes.
- Juicios y consensos: Permite incluir una síntesis de diversas opiniones sin necesidad de un consenso entre ellas.

- Disyuntiva: Toma en consideración las prioridades relativas de los factores del sistema y permite seleccionar las mejores alternativas basadas en los objetivos.
- Síntesis: Conduce a una estimación global de la conveniencia de cada alternativa.
- Medidas: Provee una escala de medidas para criterios intangibles y un método para establecer prioridades.
- Consistencia: Rastrea la coherencia lógica de los juicios utilizados en la determinación de las prioridades.

2.2.3. Procedimiento de aplicación

El procedimiento matemático a través del cual se calculan los ponderadores, se describe a continuación [8]:

1. Cada tomador de decisión define la matriz de comparación por pares, P , donde los valores p_{ij} corresponden a la importancia relativa del criterio i -ésimo con respecto del criterio j -ésimo (ecuación 1).

$$P = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & p_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde, m = número de criterios a comparar

2. En el proceso de comparación, una vez determinada la matriz singular superior, se puede obtener la matriz triangular inferior mediante la ecuación (2).

$$p_{ij} = \frac{1}{p_{ij}} \quad (2)$$

3. En caso de que exista más de un tomador de decisiones, se utiliza la media geométrica (ecuación 3) para integrar respuestas de participantes en una sola matriz.

$$p_{ij}^* = \sqrt[k]{\prod_{h=1}^k a_{ij}^h} \quad (3)$$

donde, k = número de participantes involucrados
 a_{ij}^h es el juicio del involucrado h para el par de criterios i,j .

Entonces, obtenemos la nueva matriz P^* (ecuación 4).

$$P^* = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & p_{1m}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1}^* & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. Luego, para obtener la matriz de comparación de pares normalizada, X , se debe dividir cada elemento en P por la suma de sus columnas (ecuación 5).

$$X = \begin{bmatrix} 1/\sum_{i=1}^m p_i & \cdots & p_{1m}/\sum_{i=1}^m p_i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1}/\sum_{i=1}^m p_i & \cdots & 1/\sum_{i=1}^m p_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1m} & \cdots & x_{mm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

5. Para obtener el vector de ponderaciones de los criterios (W), se deben promediar las filas de la matriz X (ecuación 6).

$$W = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_{1i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_{mi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

En la ecuación anterior, el término w_j ($j= 1, \dots, m$) corresponde a la ponderación relativa del criterio j y la suma de las ponderaciones de los criterios es 1.

6. Finalmente, se realiza test de consistencia para verificar que los juicios de expertos cumplan con los principios de transitividad y proporcionalidad. Para lograr esto, se calcula la Relación de Consistencia (RC) a través de la ecuación 7.

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

donde,

RI: corresponde al índice aleatorio definido según el tamaño de la matriz de comparación, estos índices se obtienen de la tabla 2.

CI: Índice de Consistencia, obtenido a través de la siguiente fórmula.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1}$$

donde,

λ_{max} : máximo valor propio de matriz de comparaciones a pares.

m: tamaño de matriz.

Tabla 2: Índices aleatorios por tamaño de matriz

Tamaño de la matriz	Consistencia aleatoria
1	0
2	0
3	0.58
4	0.9
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

Fuente: Thomas L. Saaty, "Decision Making for Leaders: The Analytical Hierarchy Process for Decisions in a Complex World".

Si Relación de Consistencia (RC) es menor a 0.1, entonces los juicios son consistentes. En caso contrario la matriz sería inconsistente y se debe reevaluar juicios y volver a consultar a expertos para que completen la matriz de comparaciones a pares.

Capítulo 3: Tipología de Proyectos

"In rivers, the water that you touch is the last of what has passed and the first of that which comes; so with present time."

-Leonardo da Vinci

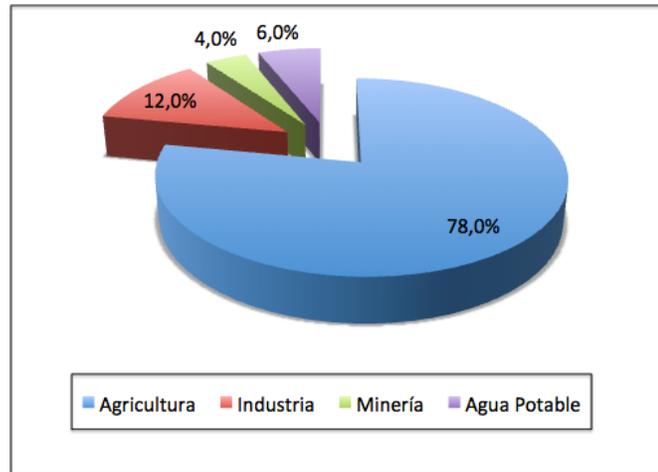
Dado que el presente trabajo se centra en el desarrollo y posterior aplicación de un modelo de priorización de infraestructura hidráulica, con foco en las grandes obras de riego; a continuación se realiza una breve descripción de los proyectos de infraestructura de riego, las metodologías de planificación, toma de decisión y priorización que se llevan a cabo en las diversas instituciones que participan del proceso.

3.1. Proyectos de infraestructura de riego

El principal propósito de los proyectos de embalses y obras hidráulicas anexas es proveer agua para riego. Esto debido a que una de las mayores dificultades que enfrentan los productores agrícolas es la escasez y/o suministro irregular de agua para el desarrollo rentable de su actividad.

Un sistema de riego consiste, básicamente, en un conjunto de obras destinadas a la captura, transporte, distribución y regulación de los recursos hídricos, desde su origen hasta los lugares donde serán empleados [5].

El recurso hídrico tiene un carácter de multiuso y, prácticamente, todas las actividades económicas ligadas a recursos naturales utilizan el agua como insumo fundamental en sus procesos productivos (como se puede observar en la Ilustración 3). Es por esto que los proyectos asociados a obras de riego se elaboran bajo un enfoque de manejo integrado de cuencas, donde se considera la cuenca como unidad de planificación. De esta manera, se incorpora dentro del análisis las interacciones entre los actores relevantes de la cuenca y se aplica una estrategia de desarrollo socioeconómico sostenible en el mediano y largo plazo [5].



Fuente: Manual para Obras de Aprovechamiento Hidráulico – Comisión Nacional de Riego.

La línea de procesos básica para la formulación y evaluación de obras de riego, como un sistema integrado de cuencas, implica el uso de la siguiente secuencia [5]:

- Identificación, definición del problema y requerimientos del proyecto.
- Identificación de las alternativas de proyecto.
- Definición de la situación sin proyecto.
- Definición de la situación con proyecto
- Análisis de rentabilidad del proyecto.
- Análisis comparado de alternativas.
- Análisis de riesgo
- Evaluación ex-post

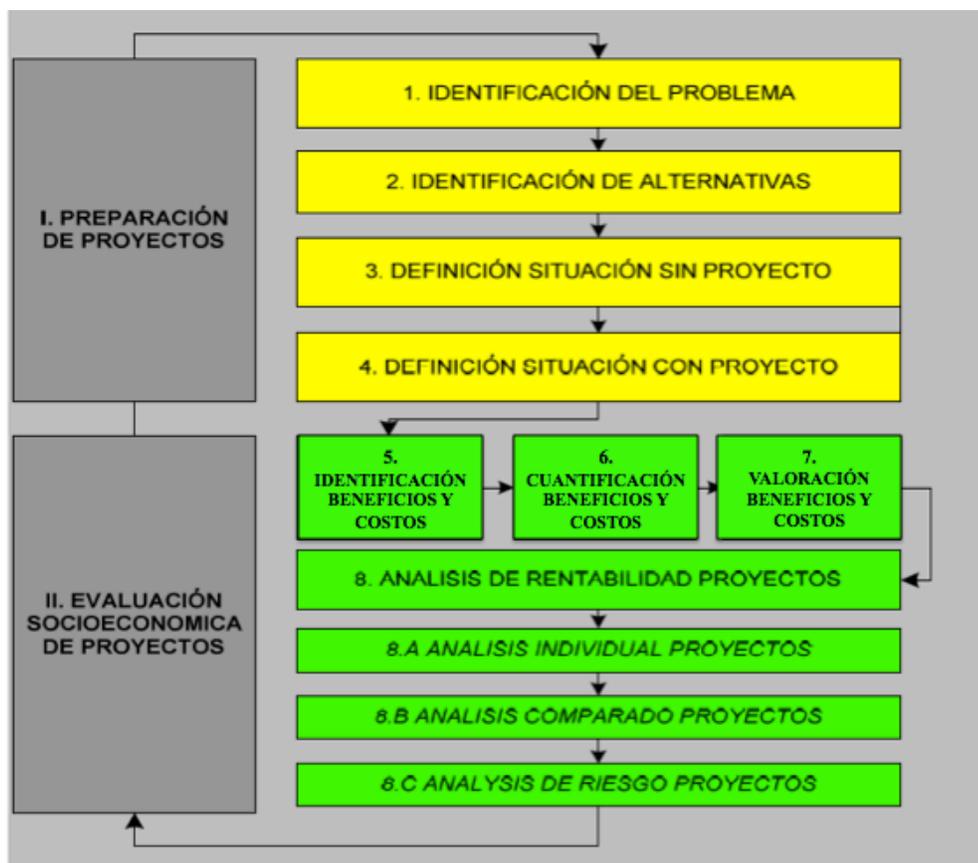
En la Ilustración 4 se puede observar el proceso de preparación y evaluación de proyectos, determinado por la Comisión Nacional de Riego (CNR)¹.

El flujo comienza con la identificación y descripción del problema o necesidad, donde deben plantearse los requerimientos del proyecto. Luego, se debe realizar una identificación de las alternativas de proyecto, de forma de proyectar y evaluar los posibles usos que se le pueden dar a los recursos hídricos disponibles. En esta etapa se debe realizar una descripción y análisis de todas las posibilidades o alternativas de solución (viables técnica y legalmente) al problema identificado. Posteriormente se realiza una descripción de la situación sin y con proyecto, para evaluar que,

¹ La Comisión Nacional de Riego (CNR) es una entidad perteneciente al Ministerio de Agricultura (MINAGRI), institución del estado encargada de fomentar, orientar y coordinar la actividad silvoagropecuaria del país [14]. La CNR tiene por misión "la administración de los concursos del programa de Fomento a la Inversión Privada en Obras de Riego y Drenaje" y sus principales objetivos son: generar, aplicar y difundir las normativas de los concursos para obras de riego y drenaje; difundir los beneficios de la Ley de los programas; Generar instancias de capacitación para consultores, agricultores y sus respectivas organizaciones; y generar programas de colaboración que permitan eliminar brechas de postulación a los concursos [15].

efectivamente, el proyecto esté contribuyendo y aportando mejoras. Para lograr esto, se realiza un análisis de rentabilidad, donde se utilizan los indicadores calculados a partir del flujo de beneficios y costos de una alternativa de proyecto y se determina si su ejecución es mejor que la situación sin proyecto. Luego, se realiza un análisis de riesgos, de forma de identificar las variables aleatorias que estén influyendo (directa o indirectamente) en la rentabilidad del proyecto [5].

Ilustración 4: Proceso de preparación y evaluación de proyectos



Fuente: Manual para Obras de Aprovechamiento Hidráulico – Comisión Nacional de Riego.

Se presenta una metodología de evaluación socioeconómica de proyectos ex-ante para determinar los beneficios esperados que la sociedad percibirá con la construcción y ejecución de la obra. Esta metodología incluye la estimación de los efectos directos, efectos indirectos y externalidades que el proyecto genere para determinar el Valor Actual Neto Social de los beneficios futuros [5].

Adicional a esto, se presenta una metodología de evaluación ex-post de proyectos, para determinar beneficios reales percibidos por la sociedad luego de la construcción y ejecución del proyecto. Esta evaluación se utiliza para determinar la eficacia y eficiencia del uso de los recursos de inversión pública, de forma de verificar si efectivamente las iniciativas de inversión cumplen con los objetivos esperados [5].

3.2. Descripción del proceso general de planificación y toma de decisiones

El proceso de toma de decisiones de las inversiones de infraestructura hidráulica comienza en el momento en que las necesidades son detectadas y planteadas en diagnósticos, los cuales se realizan a nivel nacional y regional. Esto se materializa en forma de programas o proyectos específicos, donde se requiere considerar los objetivos de desarrollo territorial y sectorial, así como también, los beneficios sociales que cada una de las iniciativas genera.

El marco general que ordena el proceso de toma de decisiones en inversión pública en Chile, es el denominado *Sistema Nacional de Inversiones* administrado por el Ministerio de Desarrollo Social (MDS). Este proceso se realiza a través del *Subsistema de Análisis Técnico y Económico* perteneciente al SNI, el cual cuenta con una serie de normas, instrucciones y procedimientos que permiten homogeneizar y coordinar el proceso de identificación, formulación, presentación y evaluación de las iniciativas de inversión del sector público. El principal objetivo de dicho organismo es “*orientar el proceso de asignación de recursos hacia aquellas oportunidades de inversión más rentables*” [3].

El Análisis Técnico y Económico comprende la revisión y calificación de las iniciativas de inversión formuladas y evaluadas por las instituciones del nivel de administración centralizado (Ministerios, Servicios, Gobiernos Regionales y Municipios) y de las Empresas Públicas. Este es realizado a nivel central por profesionales del Departamento de Inversiones del Ministerio de Desarrollo Social (MDS) y a nivel regional por profesionales de las Secretarías de Planificación y Coordinación (SERPLAC) de cada región [4].

El Análisis Técnico Económico se realiza para tres tipos de iniciativas de inversión: Estudios básicos, Programas y Proyectos. En el caso de los Proyectos, éstos se entienden como una decisión sobre el uso de recursos con el fin de incrementar, mantener o mejorar la producción de bienes o prestación de servicios [4].

Una iniciativa de proyecto de inversión pública, surge como consecuencia de la identificación de necesidades insatisfechas o problemas, que afectan a un grupo de la población y que su solución puede ser abordada por la intervención del estado, acorde con una política o estrategia global, sectorial o territorial. Tanto la estrategia, como las acciones concretas que emanan de ella son gestadas a partir de un diagnóstico sectorial, competencia de los distintos Ministerios y sus instituciones asociadas [5].

El proceso de evolución de una idea en proyecto, se denomina “ciclo de vida de un proyecto” y presenta tres estados sucesivos de desarrollo [5]:

- 1. Pre-inversión.**
- 2. Inversión.**
- 3. Operación.**

1. Pre-inversión: Proceso que permite identificar ideas de inversión, formular, evaluar y seleccionar los proyectos más rentables desde el punto de vista económico y social. Las etapas secuenciales sobre las cuales se toman decisiones respecto de avanzar con el estudio de pre-inversión o desechar la iniciativa, son [5]:

- Idea: identifica la iniciativa de inversión, y especifica la necesidad insatisfecha o problema por resolver, el conjunto de posibles beneficios y su localización geográfica, y los objetivos que en relación con esos beneficios se espera alcanzar con la inversión.
- Perfil: incorpora información adicional y detalla aquella proveniente de la etapa de Idea. Con esta información se debe hacer una evaluación preliminar de la iniciativa de inversión.
- Pre-factibilidad: precisa con mayor detalle la información proveniente de los niveles anteriores y se incorporan datos adicionales para permitir descartar ciertas alternativas y perfeccionar las restantes.
- Factibilidad: perfecciona la alternativa que haya resultado con el mejor indicador de evaluación (por ejemplo mayor valor actual neto (VAN) positivo en la etapa de pre-factibilidad), reduciendo su rango de incertidumbre a límites aceptables.
- Diseño: para la tipología proyectos, ajusta mediante la ingeniería y arquitectura, los detalles finales previos a la ejecución y las bases para la contratación de las obras.

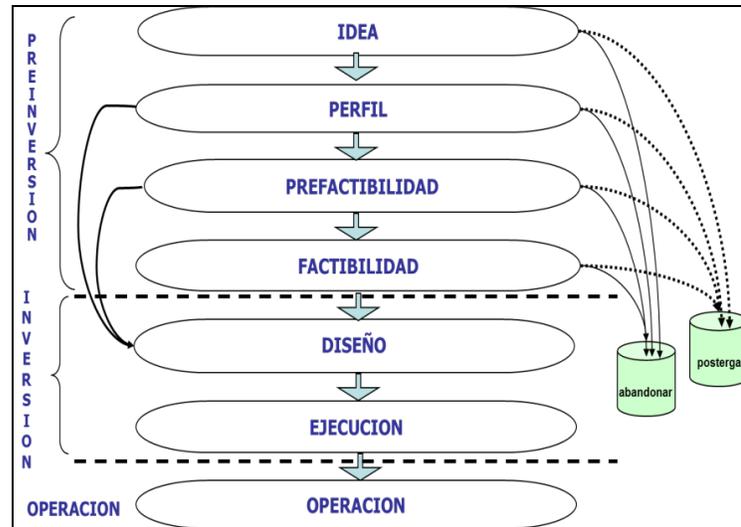
2. Inversión: Corresponde a todas las acciones tendientes a ejecutar físicamente la iniciativa de inversión tal y como fue especificado en la pre-inversión, a fin de concretar en la operación del mismo los beneficios netos estimados [5].

3. Operación: Incluye puesta en marcha de una iniciativa de inversión y generación de los beneficios netos estimados en el estado de pre-inversión [5].

Para el caso de los proyectos de inversión de las Empresas Públicas, el análisis técnico económico se centra en verificar la rentabilidad privada y social de las iniciativas y su coherencia con el plan estratégico correspondiente [4].

En el esquema de la figura 5 se resume el procesos de análisis y toma de decisiones, poniendo como eje principal las distintas etapas del ciclo de vida de un proyecto.

Ilustración 5: Toma de decisiones en el ciclo de vida de un proyecto



Fuente: División de Planificación, Estudios e Inversión - Ministerio de Desarrollo Social.

El proceso anterior es iterativo y no todos los proyectos, necesariamente, atraviesan por cada una de las etapas antes mencionadas. Dependiendo de la información y características del proyecto, en cualquiera de estas etapas se puede tomar una de cuatro decisiones [12]:

1. Decisión de asignarle recursos y ejecutarlo: En caso que la información sea suficiente y demuestre que el proyecto es viable.
2. Decisión de proceder a la siguiente etapa: En caso de que la información no sea suficiente para sustentar la decisión.
3. Decisión de aplazar proyecto para revisar información en una oportunidad futura: En caso de que la información demuestre que el proyecto es viable, pero no están dadas las condiciones favorables para su ejecución.
4. Decisión de desechar el proyecto: En caso de que la información disponible demuestre que el proyecto definitivamente es inviable.

3.3. Metodología de Priorización de Embalses

La priorización de proyectos es relevante cuando no se dispone de recursos suficientes para ejecutar todos los proyectos que son beneficiosos para la sociedad. En este caso, se deben seleccionar aquellos proyectos que maximicen el bienestar social con los recursos disponibles.

En base a lo anterior, la Comisión Nacional de Riego (CNR) dispone de una metodología estandarizada para priorizar proyectos de embalses y obras

hidráulicas anexas. Este procedimiento se encuentra descrito en el documento "Manual para Obras de Aprovechamiento Hidráulico" [5].

En el manual se estipula el siguiente mecanismo de priorización de proyectos [5]:

- Si no existe racionamiento de capitales y los proyectos son independientes, se deben aceptar todos aquellos proyectos que tengan VAN mayor que cero, a la tasa de descuento adecuada, y ordenarlos de mayor a menor de acuerdo a este indicador económico. En caso de que los proyectos sean interdependientes, el orden dependerá de la tasa de descuento.
- En caso de que exista racionamiento de capitales, entonces se dispone de un presupuesto fijo que se debe asignar a diversos tipos de proyectos, ya sean estos sustitutos o complementarios. Bajo esta situación, la cartera presupuestaria puede maximizarse ordenando los proyectos de acuerdo al indicador económico IVAN, hasta agotar los fondos disponibles.

3.4. Descripción embalses a considerar en el estudio

Hoy en día, la Dirección de Obras Hidráulicas cuenta con una cartera de 16 nuevos proyectos de embalses con una proyección de construcción progresiva hasta el año 2021. A través de estos proyectos, se busca incrementar en un 36% la capacidad actual de regulación (en 1.594 millones de m³), de forma de extender la superficie regada en aproximadamente 206.700 hectáreas. Lo anterior implica una inversión superior a los 2.500 millones de dólares para el total de la cartera de proyectos [36].

Dichos embalses se encuentran distribuidos a lo largo de todo el país, por lo cual tienen diversas características en términos del territorio, tamaño del proyecto, disponibilidad del recurso hídrico, características de las comunidades aledañas, flora y fauna de la zona. Adicional a esto, los proyectos se encuentran en distintas etapas de desarrollo y los montos de inversión varían significativamente entre un embalse y otro.

Para el presente proyecto y con motivo de una aplicación preliminar del modelo, se seleccionan cuatro proyectos pilotos. Para la selección del proyecto, primero se consideraron todos aquellos que tuviesen la mayor cantidad de datos disponibles. Luego, se consideraron solo aquellos proyectos que se encontraran en las regiones norte y centro del país. Finalmente, se consideraron solo aquellos proyectos que se encuentren en etapas de factibilidad o diseño.

A continuación, se caracterizan los cuatro proyectos de embalses seleccionados para la aplicación preliminar del modelo. Esta información fue obtenida de las fichas oficiales de los proyectos, actualizadas y publicadas por la Dirección de Obras Hidráulicas durante los meses de agosto y septiembre del 2013.

Debido a que las obras de riego considerados en el proyecto se encuentran en estudio, no se describirá en detalle cada uno de ellos, sino que se dará una breve descripción global de cada embalse.

3.4.1. Embalse A

Corresponde a un embalse multipropósito de 50 hm³ de capacidad útil, destinado a regular los recursos hídricos del río donde se ubica, de forma de mejorar y extender el riego en el valle desde una superficie de 840 hectáreas regadas actualmente, hasta 3.250 hectáreas con una seguridad de un 85%. Adicional a esto, el proyecto dará respaldo a diversos servicios de Agua Potable Rural de la zona, los cuales abastecen a cerca de 670 habitantes. Además, el embalse permitirá la generación hidroeléctrica de una mini central ubicada al pie de la presa con una capacidad de 1 megavatio.

El monto estimado de la inversión con IVA¹ corresponde a 2.369.638 UF (equivalente a 54.572 MM\$) y el VAN Social del proyecto es de 59.858 MM\$ con una TIR del 11,7%.

Actualmente el proyecto se encuentra en la etapa de diseño, para lo cual se está realizando una licitación de consultoría a terminar el mes de enero del año 2014, previa aprobación del Ministerio de Desarrollo Social.

3.4.2. Embalse B

Corresponde a un embalse de 17 hm³ de capacidad, destinado a regular los recursos hídricos del río donde se ubica, de forma de mejorar y extender el riego en el valle a una superficie de 2.235 hectáreas con una seguridad de un 85%. Adicional a esto, el proyecto ayudará a mitigar los daños que las crecidas generadas por el invierno altiplánico provocan tanto en las zonas agrícolas como en la infraestructura vial y ferroviaria.

El monto estimado de la inversión con IVA corresponde a 49.001 MM\$² y el VAN Social del proyecto es de 7.025 MM\$ con una TIR del 11,6%.

Se encuentra terminada la consultoría de diseño del embalse y el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) se ingresó al SEA el año 2012 y aún se encuentra en evaluación.

¹ Moneda al 27 de agosto del año 2013.

² Moneda año 2012.

3.4.3. Embalse C

Corresponde a un embalse multipropósito de 50 hm³ de capacidad útil. Destinado a regular los recursos hídricos del río donde se ubica, con motivo de mejorar y extender el riego en el valle desde una superficie de 1.610 hectáreas regadas actualmente con baja seguridad, hasta 4.940 hectáreas con una seguridad de un 85%. Adicional a esto, el proyecto permitirá dar respaldo a diversos servicios de Agua Potable Rural existentes en la zona, los cuales abastecen a cerca de 2.249 habitantes. Además, el embalse permitirá la generación hidroeléctrica de una mini central de capacidad de 2,4 megavatio ubicada al pie de la presa.

El monto estimado de la inversión con IVA¹ corresponde a 3.223.334 UF (equivalente a 74.305 MM\$) y el VAN Social del proyecto es de 58.465 MM\$ con una TIR del 9,5%.

Actualmente el proyecto se encuentra en la etapa de diseño, ya se inició la licitación de la consultoría, la cual fue aprobada por el Ministerio de Desarrollo Social, con el alcance de que se debe actualizar la evaluación económica de este.

3.4.4. Embalse D

El proyecto tiene como principal objetivo la regulación de los recursos hídricos del sector, los cuales son bastante escasos. Con la construcción del proyecto se pretende mejorar y extender el riego en el valle hasta 5.557 hectáreas con una seguridad de un 85%.

El monto estimado de la inversión con IVA² corresponde a 119.539 MM\$ y el VAN Social del proyecto es de 47.464 MM\$ con una TIR del 11,4%.

Actualmente el proyecto se encuentra en la etapa de diseño, será ingresado al Sistema de Evaluación Ambiental y sus obras complementarias se encuentran en proceso de licitación para consultoría.

¹ Moneda al 27 de agosto del año 2013.

² Moneda al 27 de agosto del año 2013.

Capítulo 4: Modelo de Priorización

"In questions of science, the authority of a thousand is not worth the humble reasoning of a single individual."

— Galileo Galilei

4.1. Descripción del modelo jerárquico

Como se especificó en el ítem de "*Selección de método de análisis multicriterio*", la decisión sobre la mejor alternativa es significativamente sensible a los criterios considerados, ponderadores asignados y datos utilizados [19]. Es por este motivo que los criterios e indicadores a considerar en el presente estudio, fueron definidos en conjunto con un grupo de expertos¹ del equipo consultor a cargo del proyecto. Sin embargo, no todos los criterios e indicadores de esta memoria coinciden con los presentados por el equipo consultor.

4.1.1. Criterios *macro* y primer nivel de subcriterios

A continuación, se definen y caracterizan los criterios propuestos para el modelo de priorización de obras hidráulicas de riego. En la ilustración 6 se pueden observar los tres primeros niveles del esquema jerárquico propuesto.

En el primer nivel se considera el objetivo global de la herramienta, el cual corresponde a "*Priorizar grandes obras de riego en el contexto de la planificación presupuestaria anual de la DOH*". Los criterios y subcriterios del modelo serán evaluados en base a dicho objetivo.

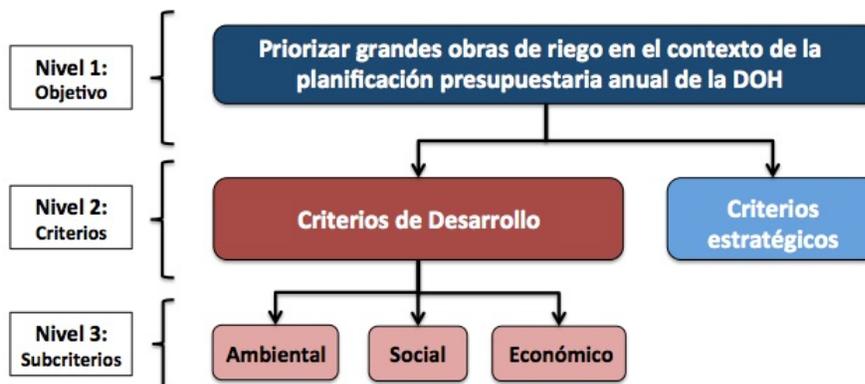
En el segundo nivel jerárquico, se consideran los criterios *macro*, los cuales corresponden a criterios de desarrollo y criterios estratégicos.

1. Criterios de desarrollo: Están asociados directamente con las características de los proyectos en sí.
2. Criterios estratégicos: Apuntan a aspectos indispensables de la institución y gobiernos regionales. Corresponden a criterios políticos y están directamente relacionados con las estrategias de desarrollo regional y comunal.

Debido a la dificultad de evaluar estos criterios de forma directa, el segundo nivel se segmenta en diversos subcriterios.

¹ El equipo consultor que participó en el proyecto está constituido por dos consultores titulados de ingeniería civil industrial, especialistas en evaluación de proyectos. También participaron seis profesionales de ingeniería civil hidráulica, dos de ellos especializados en sustentabilidad e impacto ambiental.

Ilustración 6: Esquema jerárquico de criterios, primeros niveles



Fuente: Elaboración propia

En el tercer nivel se identifican los primeros subcriterios, donde la variable de desarrollo es fraccionada en criterios de tipo ambiental, social y económico. Estos tres subcriterios corresponden a los denominados por David Yates en el taller de expertos como *Triple Bottom Line (TBL)*.

El concepto TBL se enfoca no solo en el valor económico de los proyectos, sino que también considera la contribución de estos en términos sociales y ambientales. Al tener en consideración el desempeño de estos tres componentes, directamente se está incorporando en el modelo la noción de desarrollo sostenible, ya que a través del TBL se están tomando decisiones en base a conceptos como "responsabilidad social" y "sustentabilidad" [28].

4.1.2. Subcriterio social

La gestión del recurso hídrico corresponde a un problema complejo, donde hay diversos actores involucrados con distintos intereses y objetivos. Esto hace indispensable la necesidad de identificar entre *lo que es importante* para el impulso del proyecto y *lo que es relevante* para el desarrollo de la comunidad, por lo cual las decisiones son cada vez más complejas [16].

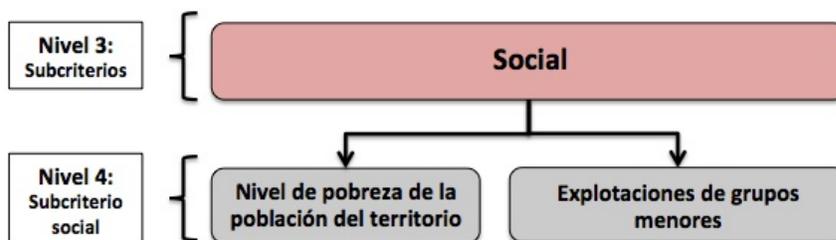
Las grandes obras de riego, como son los embalses, generarán cambios positivos y/o negativos en las comunidades aledañas a los proyectos, las cuales se denominan externalidades. Estos cambios tienen consecuencias importantes en el largo plazo y nos enfrentamos a la situación "*donde los factores son inciertos, los valores están en disputa, las apuestas son altas y las decisiones urgentes*" [16].

Dadas las características de este tipo de proyectos, se hace indispensable la inclusión tanto de factores intrínsecos del territorio donde se ubica la obra como de las consecuencias que esta tendrá en términos del desarrollo de la comunidad [31].

El subcriterio social agrupa aquellos componentes de los proyectos que tengan influencia, ya sea de forma directa o indirecta, en la calidad de vida de las personas. A través de este subcriterio, se desea incluir en el modelo el impacto que tienen estas grandes obras en dichas comunidades.

En la ilustración 7 se observa el esquema jerárquico para el subcriterio social, donde se observa el nivel 3 y 4 del modelo.

Ilustración 7: Esquema jerárquico subcriterio social



Fuente: Elaboración propia

El criterio social considera dos subcriterios, uno de los cuales tienen directa relación con la población que reside en el territorio impactado por la obra y el otro tiene relación con el proyecto en sí.

Nivel de pobreza de la población

A través de este subcriterio se desea incluir las características de la población que reside en el territorio impactado por el proyecto. El objetivo es priorizar aquellos proyectos que tienen impacto en un territorio donde la población presenta un mayor nivel de pobreza¹, esto con motivo de dar prioridad a aquellas comunidades más pobres para que accedan al recurso hídrico ya sea para riego u otros usos.

El indicador propuesto para medir este subcriterio corresponde a la *tasa de pobreza a nivel comunal (SAE)*².

Explotaciones de grupos menores

El subcriterio de explotaciones de grupos menores busca priorizar aquellos proyectos que tienen impacto en territorios con mayor proporción de grupos particulares (familias) y/o pequeños empresarios que utilizan el recurso hídrico ya sea para ganadería o agricultura. De esta forma se dará

¹ Se propone este indicador en lugar del Índice de Desarrollo Humano (IDH), pues a nivel comunal la información disponible para este indicador es del año 2000, mientras que los datos de pobreza a nivel comunal se actualizan con mayor periodicidad.

² La tasa de pobreza a nivel comunal se calcula mediante la aplicación de una metodología de estimación para áreas pequeñas (SAE). Los datos utilizados provienen de las estadísticas publicadas por el Ministerio de Desarrollo Social, las cuales son calculadas a través de un análisis de la información recopilada en la encuesta CASEN.

preferencia a aquellos proyectos de los cuales se favorece a estos grupos por sobre las grandes empresas e industrias que requieran del recurso hídrico.

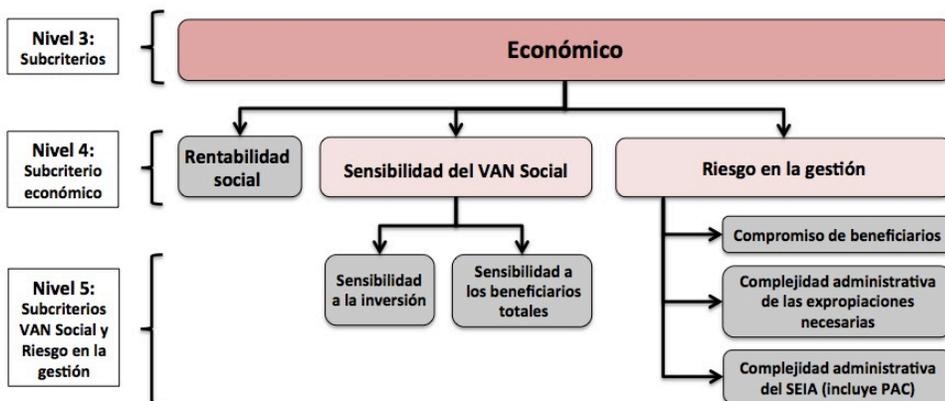
El indicador propuesto para medir este subcriterio corresponde a un índice que se denominará *índice de grupos menores*, a través del cual se calcula el porcentaje de explotaciones que hay en la comuna correspondientes a menos de 100 hectáreas.

$$\text{Índice de grupos menores (\%)} = \frac{\text{Superficie explotaciones menores a 100 (ha)}}{\text{Superficie total explotada de la comuna}}$$

4.1.3. Subcriterio económico

Se entiende por evaluación económica a la asignación de los recursos disponibles en forma óptima, teniendo en cuenta los efectos del proyecto sobre diversas variables, entre las cuales se considera el valor del consumo, impacto del proyecto, beneficios y costos. En la evaluación económica se busca orientar los recursos de acuerdo al objetivo de *eficiencia*, mientras que la evaluación social de proyectos tiene principal foco en el concepto de *equidad* [37].

Ilustración 8: Esquema jerárquico subcriterio económico



Fuente: Elaboración propia

Para el caso del subcriterio económico a considerar en el presente estudio, se propone mantener las formas vigentes de evaluación económica de proyectos, de forma de aprovechar los recursos actualmente disponibles. El indicador económico comúnmente utilizado en la evaluación de proyectos corresponde al VAN Social, el cual cumple tanto con el objetivo de eficiencia como el de equidad.

En la ilustración 8 se puede apreciar el esquema jerárquico del subcriterio VAN económico, donde se identifican los niveles 3, 4 y 5 del modelo.

El criterio económico considera tres subcriterios, dos de los cuales están relacionados con la rentabilidad del proyecto en sí y uno guarda relación con los potenciales riesgos que podrían influir en la rentabilidad de este.

Rentabilidad social del proyecto

A través del criterio de rentabilidad social del proyecto, se desea incluir dentro del modelo los beneficios que obtiene la sociedad mediante el desarrollo de las grandes obras de riego. Estos valores se estiman utilizando precios sociales, lo que para el caso de los embalses se ve reflejado en los beneficios obtenidos debido a una mayor disponibilidad de agua, la liberación de los recursos hídricos y el aumento de la eficiencia en el riego. Esto permite la incorporación de nuevas tierras para actividades productivas y mejorar los ingresos de aquellos que fueron regados, ya sea a través de una mayor asignación de agua y/o un aumento en la seguridad de riego.

El indicador comúnmente utilizado para el cálculo de la rentabilidad social de un proyecto corresponde al VAN Social. Sin embargo, en caso de proyectos bajo condiciones de racionamiento de capital, es decir, cuando no hay suficientes recursos para el desarrollo de todos los proyectos (como es el caso de los embalses), el índice de valor actual neto (IVAN) permite tomar decisiones más certeras que el VAN y la TIR. Es por este motivo que para el presente trabajo se utiliza el indicador IVAN como medida de la rentabilidad social del proyecto.

$$IVAN\ Social = \frac{VAN\ Social}{Inversión\ Social}$$

Sensibilidad del VAN Social

A través de este subcriterio se desea incluir en el modelo la sensibilidad que tiene el VAN Social de acuerdo a dos factores que podrían afectarlo: la inversión y los beneficios presupuestados para cada proyecto. Este criterio fue dividido en dos subcriterios, de forma que uno de estos refleje la sensibilidad del VAN Social a la inversión y el otro refleje la sensibilidad a los beneficios totales.

El indicador a utilizar para medir la sensibilidad del VAN Social respecto de la inversión presupuestada corresponde al *índice de sensibilidad de la inversión*, valor que mide el porcentaje de variación de la inversión que hace que la rentabilidad social del proyecto sea igual a cero:

$$\text{Índice de Sensibilidad de la Inversión (\%)} = \frac{\text{Monto inversión tal que VANs sea cero}}{\text{Inversión presupuestada}}$$

Ahora, para medir la sensibilidad del VAN Social respecto de los beneficios presupuestados se utilizará el *índice de sensibilidad de los*

beneficios, valor que mide el porcentaje de variación de los beneficios presupuestados que hace que la rentabilidad social del proyecto sea igual a cero:

$$\text{Índice de Sensibilidad de los beneficios (\%)} = \frac{\text{Monto beneficios tal que VANs sea cero}}{\text{Beneficios presupuestados}}$$

Riesgo en la gestión

A través de este subcriterio se desea incorporar en el modelo todos aquellos potenciales riesgos que puedan afectar, directa o indirectamente, la rentabilidad social del proyecto. Como riesgo en la gestión es un criterio bastante amplio, se segmentó en tres subcriterios, los cuales son:

1. Nivel de compromiso de los beneficiarios del proyecto: Este factor afecta positivamente al modelo, ya que a medida que mayor es el compromiso de los beneficiarios directos del proyecto, mayor será la rentabilidad social del proyecto.

El indicador a través del cual se medirá este subcriterio corresponde al aporte (en términos porcentuales) que han realizado los beneficiarios del proyecto:

$$\% \text{ aporte privado etapas preinversión} = \frac{\text{Aporte privados a estudios preinversión}}{\text{Gasto total en estudios preinversión}}$$

2. Complejidad administrativa de las expropiaciones necesarias: Este factor afecta negativamente al modelo, ya que mientras mayores complejidades existan en las gestiones de expropiaciones de terrenos aledaños al proyecto, menor será la rentabilidad social de este mismo.

El indicador a través del cual se medirá este subcriterio corresponde a una escala que varía entre los valores 0 y 3, de la siguiente forma:

$$\text{Complejidad expropiaciones} = \begin{cases} 0, \text{no son necesarias expropiaciones.} \\ 1, \text{baja complejidad en expropiaciones.} \\ 2, \text{complejidad media en expropiaciones.} \\ 3, \text{expropiaciones complejas.} \end{cases}$$

Se considera como baja complejidad en expropiaciones si en el lugar de inundación no hay pueblos y la cantidad de personas viviendo en la localidad es menor a 10 personas (casas aisladas), por lo cual no se requiere de un plan de reasentamiento.

La complejidad media en expropiaciones se considera cuando es necesario el reasentamiento de algún pueblo, donde este no tenga más de 20 personas.

Se considera como expropiaciones complejas cuando es necesario el reasentamiento de pueblos con más de 20 habitantes.

3. Complejidad administrativa del SEIA¹ (incluyendo PAC²): Al igual que en el punto anterior, a mayor complejidad administrativa del SEIA por parte del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y a mayor complejidad en la gestión de la Participación Ambiental Ciudadana (PAC), menor será la rentabilidad social del proyecto.

El indicador a través del cual se medirá este subcriterio corresponde a una escala que varía entre los valores 1 y 3, de la siguiente forma:

$$\text{Complejidad SEIA} = \begin{cases} 1, \text{baja complejidad administrativa SEIA.} \\ 2, \text{media complejidad administrativa SEIA.} \\ 3, \text{alta complejidad administrativa SEIA.} \end{cases}$$

Se considera como baja complejidad administrativa del SEIA si la Resolución de Calificación Ambiental (RCA)³ demora menos de 6 meses en finalizar.

Se considera como complejidad administrativa media si la RCA demora más de 6 meses y menos de 1 año en finalizar.

Se considera como alta complejidad administrativa del SEIA si la RCA demora más de un año en finalizar.

El valor *cero* asociado a “no ingresa al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)” no se considera en el presente estudio. Esto debido a que, de acuerdo a las características de las grandes obras de riego, todas deben realizar Estudios de Impacto Ambiental y, por lo tanto, todas las obras ingresan al SEIA.

¹ La sigla SEIA hace referencia al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, instrumento a través del cual se introduce la componente ambiental en el diseño y ejecución de los proyectos y actividades que se realizan en el país. A través del SEIA se evalúa y certifica que las iniciativas, tanto del sector público como privado, cumplan con las condiciones y requisitos ambientales [27].

² La sigla PAC corresponde a “Participación Ambiental Ciudadana”. A través de PAC se busca que las personas se informen, opinen y presenten sugerencias respecto de proyectos de inversión, prevención y/o descontaminación a realizar en el país. Esa participación se considera indispensable, debido a que mejora la calidad de los proyectos, planes y normas. Adicional a esto, da transparencia al proceso y solidez a la toma de decisiones por parte de las autoridades [27].

³ La Resolución de Calificación Ambiental (RCA) corresponde a un documento administrativo con el cual, una vez culminado el proceso de evaluación del Estudio de Impacto Ambiental, se establece si éste ha sido aprobado, rechazado o aprobado con condiciones. Los rangos de complejidad fueron establecidos en base a las entrevistas realizadas a expertos del Ministerio de Medio Ambiente.

A pesar de que el indicador VAN Social incluye ciertos aspectos sociales dentro de la evaluación de los proyectos, no considera todos los aspectos fundamentales, como son las características de la comunidad donde se está realizando el proyecto. Es por esto que es necesaria la inclusión de un subcriterio social a parte del económico, donde se incluyan otros aspectos relevantes para la evaluación de los proyectos.

4.1.4. Subcriterio ambiental

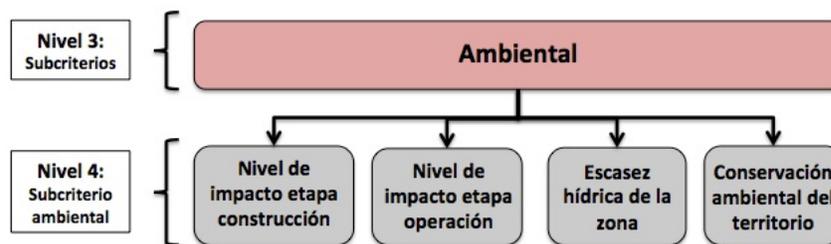
La gran mayoría de los proyectos de inversión generan efectos externos sobre el medio geográfico, generando cambios irreversibles sobre fauna, flora y organizaciones sociales [37].

Si nos enfocamos en la tipología de los proyectos en estudio, este prototipo de obras generan altos impactos en el medio ambiente. Debido a la rápida disminución de la biodiversidad en muchas zonas rurales, las amenazas a los recursos abióticos (como son los suelos y aguas) y la pérdida de la identidad rural y cultural de los paisajes, hace indispensable la inclusión de criterios ambientales en los mecanismos de evaluación y priorización del recurso hídrico [29].

A través del criterio ambiental, se desea incluir en el modelo tanto el impacto que tienen las grandes obras de riego en los sectores aledaños al lugar de construcción y operación de la obra, como las características del territorio donde estas se encuentran.

En la ilustración 9 se observa el esquema jerárquico para el subcriterio ambiental, donde se observa el nivel 3 y 4 del modelo.

Ilustración 9: Esquema jerárquico subcriterio ambiental



Fuente: Elaboración propia

El criterio ambiental considera cuatro aspectos principales, dos de ellos relacionados con el proyecto, y los otros dos relacionados con el territorio donde se ubica el proyecto.

Los subcriterios directamente relacionados con el desarrollo del embalse, corresponden al impacto ambiental que genera el proyecto tanto en

la etapa de construcción como en la etapa de operación¹. Ambos subcriterios buscan incorporar al modelo de priorización aquellos impactos de tipo ambiental que son difíciles de valorizar económicamente, por lo cual no son directamente considerados en los costos del proyecto, pero si son identificados.

Impacto ambiental en etapa de construcción del proyecto

Para la formulación de este subcriterio se utilizó la información contenida en la "Guía para la Evaluación de Impacto Ambiental de la Fase de Construcción de Proyectos" del Servicio de Evaluación Ambiental. De acuerdo a este documento, se pueden identificar como las partes y obras de la etapa de construcción a los siguientes aspectos [39]:

1. Habilitación, uso y cierre de las instalaciones de apoyo a las actividades de la fase de construcción:
 - a. Taller de mantenimiento de equipos, maquinarias y vehículos.
 - b. Campamento para hospedaje y habitabilidad de mano de obra.
 - c. Recintos asociados al manejo de insumos, tales como: almacenamiento de agua potable o industrial, acopio de áridos, almacenamiento de sustancias peligrosas (incluyendo combustibles), otros.
 - d. Recintos asociados al manejo de residuos, tales como: acopio de residuos domiciliarios, acopio de residuos de la construcción, acopio de residuos peligrosos.
 - e. Instalaciones o bodegas destinadas al almacenamiento de equipos, insumos, residuos u otros fines.
 - f. Otros recintos con distintos usos, tales como oficinas, casino, estacionamiento de vehículos.
2. Construcción, uso y cierre de instalación para el manejo de las aguas servidas: Existen diversas alternativas para manejar aguas servidas. Por lo general, se necesita construir una obra o habilitar un equipamiento para manejarlas.
3. Caminos de acceso: Caminos nuevos o existentes para acceder a las instalaciones del proyecto, donde se considera tanto el tránsito y funcionamiento de vehículos y maquinarias al interior del emplazamiento del proyecto, como el transporte de insumos, residuos y mano de obra fuera del área de emplazamiento del proyecto.
4. Construcción, uso y cierre de instalación para la producción de áridos: Por lo general, la construcción de obras de un proyecto requiere de áridos normalmente utilizados para producir hormigón o de forma directa en la construcción de obras civiles.
5. Habilitación, uso y cierre de las instalaciones para la producción de hormigón: En algunos proyectos se considera el producir hormigón a

¹ Para mayor información sobre subcriterios de impacto ambiental en etapas de construcción y operación, consultar Anexo D.

utilizar en la construcción de obras, para lo cual se requieren instalaciones adecuadas para llevar a cabo esta labor.

6. Construcción, uso y cierre de almacén de explosivos: En ocasiones se requiere realizar tronaduras utilizando explosivos, los cuales deben ser almacenados en una instalación adecuada para este fin.
7. Habilitación, uso y cierre de la instalación para el manejo de residuos de la construcción: Durante la etapa de construcción, se requiere de instalaciones para el manejo de residuos de la construcción¹.

Se propone como indicador de impacto ambiental en etapa de construcción la siguiente escala, donde el valor que tome para cada proyecto deberá ser asignado por el inspector fiscal asignado al proyecto, tomando como referencia las especificaciones señaladas en cada nivel.

Tabla 3: Indicador de impacto ambiental, etapa de construcción

Nivel de Impacto	Indicador	Descripción
Alto impacto	6	Si tiene los 6 efectos nombrados.
Medio impacto	4 ó 5	Si tiene entre 4 ó 6 de los efectos nombrados.
Bajo impacto	1, 2 ó 3	Si tiene 1 ó hasta 3 de los efectos nombrados.
No tiene impacto	0	Si no tiene ninguno de los efectos nombrados.

Fuente: Elaboración propia

Donde los efectos considerados para la etapa de construcción, corresponden a [25]:

1. Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones y residuos producidos durante la construcción de la obra.
2. Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluido el suelo, agua y aire, utilizados en la etapa de construcción del proyecto.
3. Alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de los grupos humanos aledaños al lugar de construcción.
4. Localización de obra y/o instalaciones necesarias para proyecto, en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.
5. Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona, debido al acondicionamiento del terreno para habilitar el lugar de localización de las partes y obras necesarias durante etapa de construcción.
6. Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico,

¹ Residuos de la construcción son aquellos generados durante las etapas de construcción, transformación, reparación y demolición de obras civiles. Incluyen aquellos generados en la preparación y excavación de terrenos para obras civiles.

arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural, que se encuentren en o cercanos a la obra.

El indicador a través del cual se medirá este subcriterio corresponde a una escala que varía entre los valores 0 y 3, de la siguiente forma:

$$\text{Nivel de impacto etapa construcción} = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{no tiene impacto.} \\ 1, \text{bajo impacto.} \\ 2, \text{medio impacto.} \\ 3, \text{alto impacto.} \end{array} \right.$$

Impacto ambiental en etapa de operación del proyecto

En esta caso, se consideran como impactos en la etapa de operación todas aquellos efectos provocados por la puesta en marcha de la obra.

Al igual que en el subcriterio anterior, se propone como indicador de impacto ambiental en etapa de operación la siguiente escala:

Tabla 4: Indicador de impacto ambiental, etapa de operación

Nivel de Impacto	Indicador	Descripción
Alto impacto	6	Si tiene los 6 efectos nombrados.
Medio impacto	4 ó 5	Si tiene entre 4 ó 6 de los efectos nombrados.
Bajo impacto	1, 2 ó 3	Si tiene 1 ó hasta 3 de los efectos nombrados.
No tiene impacto	0	Si no tiene ninguno de los efectos nombrados.

Fuente: Elaboración propia

Donde los efectos considerados para la etapa de operación, corresponden a [25]:

1. Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones y residuos.
2. Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluido el suelo, agua y aire.
3. Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de los grupos humanos.
4. Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.
5. Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.
6. Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

Ahora, para el caso de los subcriterios directamente relacionados con el territorio en el cual se ubica el proyecto, se considera la fragilidad ambiental de la cuenca y la escasez hídrica de la zona.

El indicador a través del cual se medirá este subcriterio corresponde a una escala que varía entre los valores 0 y 3, de la siguiente forma:

$$\text{Nivel de impacto etapa operación} = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ no tiene impacto.} \\ 1, \text{ bajo impacto.} \\ 2, \text{ medio impacto.} \\ 3, \text{ alto impacto.} \end{array} \right.$$

Conservación ambiental del territorio

A través del subcriterio de conservación ambiental se desea incorporar en el modelo las características del territorio donde se ubica el embalse, de forma de considerar los impactos que tienen proyectos de esta envergadura en la conservación biótica de las zonas. Para el presente estudio, se considerará dentro de este factor la conservación de la biodiversidad¹, esto debido a que el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) ha elaborado planos de las zonas consideradas como "prioritarias" en términos de la conservación de la biodiversidad.

El indicador a través del cual se medirá este subcriterio corresponde al *índice de conservación de la biodiversidad*². Este indicador afecta negativamente al proyecto, ya que mientras mayor sea la biodiversidad del sector, mayor cantidad de especies de flora y fauna serán afectadas y, por lo tanto, menor valor tendrá el sitio (en términos bióticos).

Escasez hídrica de la zona³

Este subcriterio busca identificar aquellas zonas con menor disponibilidad del recurso hídrico. Hoy en día, la Dirección General de Aguas (DGA) restringe el otorgamiento de nuevos derechos de aguas subterráneas cuando el recurso es escaso, por lo cual las zonas más afectadas por esta restricción corresponden a aquellas zonas donde hay mayor escasez hídrica. Para ello define dos tipos de zonas con restricciones al otorgamiento de derechos:

- a) Zona de prohibición: Zona en la cual no se pueden realizar nuevas explotaciones del recurso hídrico, esto con el objetivo de proteger un

¹ Este término hace referencia a la amplia variedad de seres vivos sobre la Tierra y los patrones naturales que la conforman. Además, la biodiversidad comprende la variedad de ecosistemas y las diferencias genéticas dentro de cada especie que permiten la combinación de múltiples formas de vida, y cuyas interacciones con el resto del entorno fundamentan el sustento de la vida.

² Este índice fue elaborado por el equipo consultor del proyecto, más específicamente, por Javier Neira, Ingeniero Civil Hidráulico.

³ Al igual que el subcriterio de *conservación ambiental del territorio*, tanto el subcriterio de *escasez hídrica* como el indicador a través del cual se medirá, fue elaborado por el equipo consultor del proyecto, más específicamente, por Javier Neira, Ingeniero Civil Hidráulico.

acuífero.

- b) Zona de restricción: Zonas en las que exista el riesgo de grave disminución de un determinado acuífero, por lo cual se otorgan derechos provisorios de aprovechamiento.

Adicional a esto, la DGA tiene la facultad de declarar el agotamiento de las fuentes naturales de aguas en una zona determinada, prohibiendo la concesión de nuevos derechos consuntivos permanentes .

El indicador a través del cual se medirá este subcriterio corresponde al *índice de escasez hídrica*. Este indicador afecta positivamente al proyecto, ya que mientras mayor sea la escasez del sector (alta la necesidad del recurso hídrico), mayor será la necesidad de realización de la obra.

$$\text{Índice de escasez hídrica} = \begin{cases} 0.25, \text{obra dentro o aguas arriba de zona de restricción} \\ 0.5, \text{obra dentro o aguas arriba de zona de prohibición} \\ 0.75, \text{zona de restricción} + \text{declaración de agotamiento.} \\ 1, \text{zona de prohibición} + \text{declaración de agotamiento.} \end{cases}$$

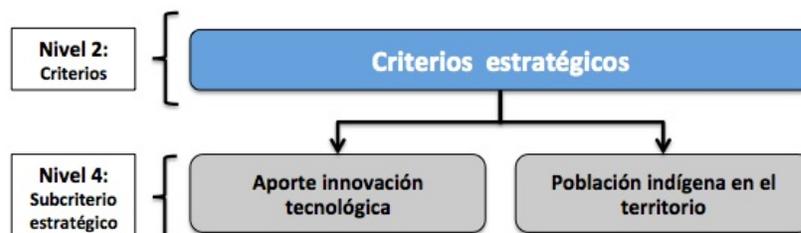
4.1.5. Criterio estratégico

La gestión y planificación del recurso hídrico representa una serie de desafíos y conflictos, entre los cuales se considera la complejidad multidisciplinaria. Esta característica hace referencia al hecho de que la incertidumbre con respecto a la disponibilidad de recursos hídricos (en términos del espacio y tiempo), hacen la labor de planificación aún más compleja [16].

Es por este motivo que se incluyen criterios estratégicos en el modelo, a través de los cuales se desea incorporar aspectos de carácter político y/o administrativo, de forma de considerar los objetivos de la institución en el proceso de planificación y gestión del recurso hídrico.

En la ilustración 10 se observa el esquema jerárquico para el criterio de desarrollo, donde se observa el nivel 2 y 4 del modelo.

Ilustración 10: Esquema jerárquico criterio estratégico



Fuente: Elaboración propia

Aporte innovación tecnológica

La División de Riego de la DOH busca incentivar la innovación tecnológica en los diversos proyectos de riego presupuestados para los próximos años. Entre las iniciativas propuestas, se considera la implementación de sistemas de infiltración artificial de agua a las napas subterráneas, las cuales permitirán aumentar los recursos disponibles en los acuíferos [36].

En otra línea de innovación, se considera la implementación de Telemetría en las grandes obras de riego, la cual corresponde a una tecnología para medir magnitudes físicas, para luego enviar la información recopilada hacia el operador del sistema. Esta técnica permite cuantificar y registrar mediciones para optimizar el uso de los recursos hídricos y así facilitar la adopción de medidas de alerta temprana en caso de riesgos [36].

El indicador a través del cual se medirá este subcriterio corresponde a una escala binaria, de la siguiente forma:

$$\text{Innovación tecnológica} = \begin{cases} 1, & \text{si el proyecto incorpora innovación tecnológica.} \\ 0, & \text{si no.} \end{cases}$$

Población indígena en el territorio

Entre los principales objetivos de la DOH se considera "*la protección del territorio y de las personas*" además de los conceptos de equidad en la distribución del recurso hídrico [2]. De acuerdo a los datos del Censo del año 2002, la distribución de la población indígena según rama de actividad económica muestra que el conjunto de los pueblos indígenas mayoritariamente se concentra en torno a la rama "Agricultura, ganadería, caza, silvicultura, pesca" (20,2%) lo que equivale a 50.519 personas [40].

Con motivo de cumplir con la misión de la DOH y dado que la principal actividad económica de los pueblos indígenas del país requiere de recursos de agua para riego, se considera indispensable incluir la cantidad de población indígena como subcriterio del modelo.

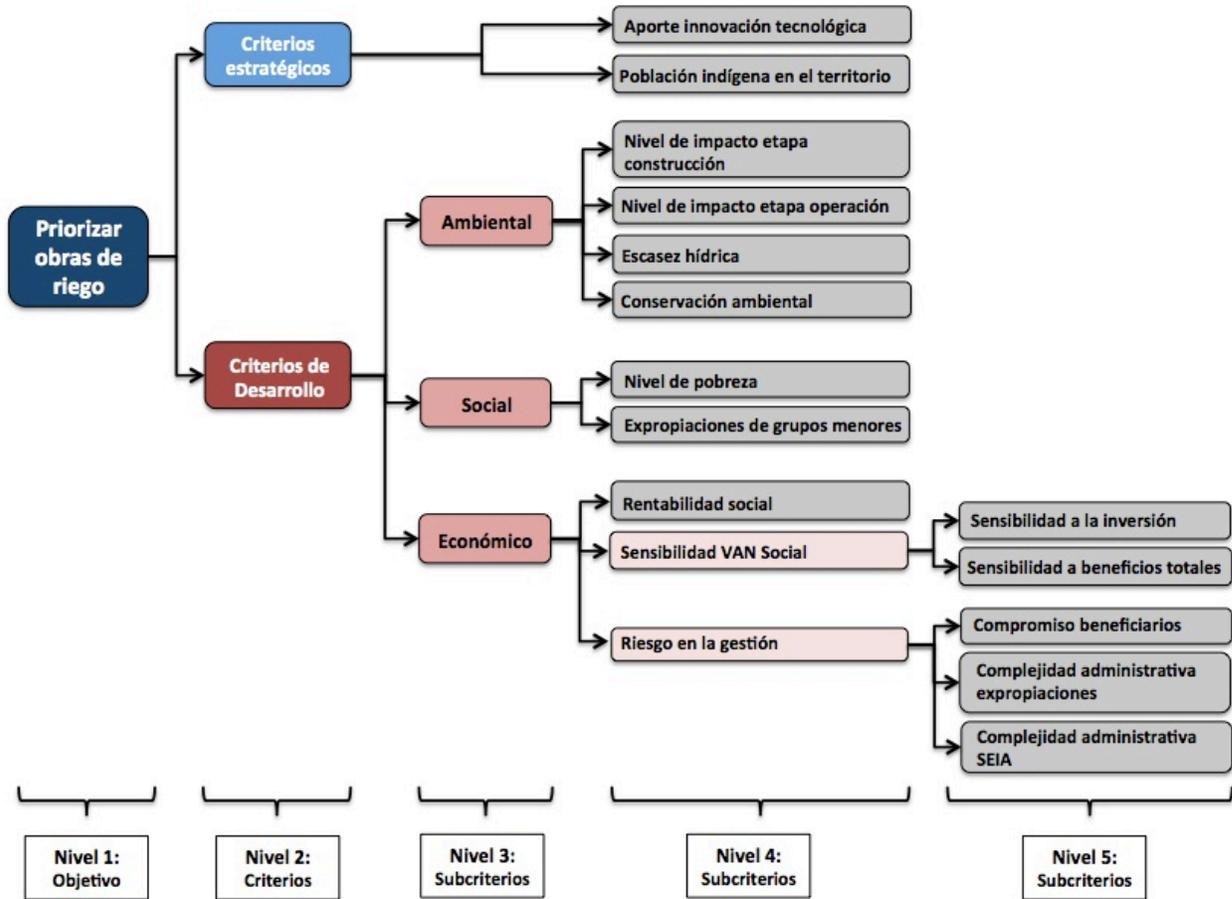
Este factor afecta positivamente al modelo, ya que a mayor cantidad de población indígena en el territorio aledaño al proyecto, mayor será la cantidad de personas de pueblos nativos con acceso a recurso hídrico.

El indicador a través del cual se medirá este subcriterio corresponde al porcentaje de población indígena de la zona impactada por el proyecto. El índice será denominado *índice de población indígena* y se obtiene a través de la fórmula:

$$\text{Índice de población indígena (\%)} = \frac{\text{Población indígena}}{\text{Población total}}$$

En la ilustración 11 se observa el esquema global jerárquico, donde se esbozan los 5 niveles y se detallan los objetivo, criterios y subcriterios del modelo general.

Ilustración 11: Esquema jerárquico global.



Fuente: Elaboración propia en base al levantamiento de información y reuniones con diversos expertos de cada área.

4.2. Importancia relativa de los criterios

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la determinación de los ponderadores del modelo. La síntesis de los datos y los procesos de cálculo necesarios, se realizaron con la ayuda del software Excel.

Según se menciona en un estudio sobre gestión del recurso hídrico utilizando técnicas multicriterio, la identidad de los participantes es de gran relevancia para el modelo. Los expertos entrevistados deben ser de diversas áreas de especialidad, tales como: ingenieros hidráulicos, ingenieros ambientales, agrónomos, economistas, expertos financieros y sociólogos. Adicional a esto, es necesario incluir tanto profesionales como técnicos de cada una de los sectores antes mencionados. Finalmente, es ideal incluir

representantes de los gobiernos locales y del gobierno central, esto con el objetivo de que el modelo refleje visiones desde distintas perspectivas [16].

Es por este motivo, que en el presente estudio se han entrevistado especialistas de las instituciones involucradas en alguna de las etapas de desarrollo de las grandes obras de riego, las cuales son:

1. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).
2. Dirección General de Aguas (DGA).
3. Comisión Nacional de Riego (CNR).
4. Ministerio de Desarrollo Social (MDS).
5. Ministerio de Medio Ambiente (MMA).

La obtención de valores para los ponderadores de los criterios y subcriterios se realizó a partir de los promedios geométricos de las valoraciones individuales de cada actor. El supuesto realizado para el uso de esta metodología, radica en que los pesos de los actores entrevistados es el mismo.

Se presentan los resultados obtenidos para la determinación de los ponderadores de cada criterio y subcriterio del modelo jerárquico, con comentarios al respecto¹.

4.2.1. Valoración relativa de criterios *macro*

De los valores esbozados en la Tabla 6, se observa que el criterio de desarrollo, con una ponderación del 79%, tiene mayor relevancia para el modelo. Lo anterior puede ser motivo de que, según el juicio de los expertos, los aspectos más importantes son aquellos ligados directamente a cada proyecto. Esto ocurre porque las características de los proyectos son muy diversas entre proyectos en una misma zona, por lo cual los embalses debiesen ser evaluados en relación a sus características intrínsecas.

Tabla 5: Valoración relativa de criterios *macro*

Criterios <i>macro</i>	Ponderación modelo
Criterio de desarrollo	0,79
Criterio estratégico	0,21

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que, a pesar de la baja ponderación del criterio estratégico (con un 21% de valoración relativa), los aspectos políticos y de desarrollo territorial están tomando cada vez más fuerza. Según lo conversado en las entrevistas con los expertos, se desea fomentar el desarrollo y potencial de los gobiernos regionales a través de diversas medidas. Sin embargo, los resultados de estas medidas se podrán observar

¹ Para mayor detalle respecto de las matrices de comparaciones a pares, cálculo de ponderadores y análisis de consistencia, consultar Anexo D.

en el largo plazo, lo cual hace imposible incluir estos aspectos en el presente estudio.

4.2.2. Valoración relativa de criterio estratégico

En la Tabla 7 se observan los resultados de la valoración relativa de los subcriterios asociados al criterio estratégico.

Tabla 6: Valoración relativa de criterio estratégico

Criterios estratégico	Ponderación modelo
Aporte innovación tecnológica	0,22
Población indígena en el territorio	0,78

Fuente: Elaboración propia

Si estudiamos el caso de las ponderaciones del criterio estratégico, el cual refleja aspectos políticos, observamos que el factor con mayor relevancia corresponde a la cantidad de población indígena en el territorio, con un 78% de valoración.

Como se mencionó anteriormente, la principal actividad productiva de la población indígena requiere del recurso hídrico, por lo cual se cree relevante dar mayor ventaja a que este tipo de comunidades tengan acceso a agua para regadío.

Otra razón por la cual se da mayor relevancia a este criterio por sobre el aporte de la innovación tecnológica, puede ser debido al deseo de protección de las comunidades indígenas que aún se encuentran en el país. Hoy en día, es un tema en boga a nivel mundial la protección y conservación no solo de las poblaciones indígenas, sino que también de sus tradiciones, costumbres y formas de vida.

Adicional a esto, se debe considerar el hecho de que la innovación tecnológica recién se está comenzando a implementar en los proyectos de la DOH, por lo cual los resultados que se obtendrán a partir de esta metodología aún no es posible observarlos. Este puede ser un motivo por el cual se dio una valoración menor a la del subcriterio de población indígena en el territorio (con una ponderación del 22%).

4.2.3. Valoración relativa de criterio de desarrollo

Como se puede observar en la Tabla 8, el criterio predominante es el criterio económico con un 38% de valoración. Sin embargo, este valor es más bajo de lo esperado. En general, la rentabilidad de los proyectos es esencial para el desarrollo exitoso de estos, debido a que si el proyecto no es económicamente rentable, entonces no debería llevarse a cabo.

Adicional a esto, se debe considerar que las actuales medidas de rentabilidad consideran aspectos económicos y sociales, por lo cual los proyectos están siendo evaluados dentro de un contexto más inclusivo,

donde la rentabilidad del proyecto estaría asociada a los beneficios económicos y sociales que este provee a la comunidad. Sin embargo, los aspectos sociales considerados en el VAN Social no son suficientes, lo cual hace necesaria la inclusión de otros factores sociales relevantes.

Tabla 7: Valoración relativa de criterio de desarrollo

Criterios de desarrollo	Ponderación modelo
Ambiental	0,27
Social	0,34
Económico	0,39

Fuente: Elaboración propia

Ahora, como podemos ver de los resultados obtenidos, el 61% restante de la ponderación recae en los criterios ambiental y social, los cuales incluyen aspectos no considerados en las evaluaciones tradicionales. Esto nos dice que los expertos entrevistados ven necesaria la inclusión y consideración de factores ambientales y sociales, no por sobre el factor económico, pero tampoco muy por debajo de este.

Asimismo, los datos observados en la tabla muestran que los expertos consideran que estos tres criterios tienen importancias similares en la evaluación de las grandes obras de riego. Como se ha mencionado anteriormente, los proyectos de embalses tienen gran impacto sobre el medio ambiente y sobre las comunidades aledañas a este. Estas externalidades son positivas y negativas, por lo cual es relevante incluir estos factores en el modelo de forma de evaluar los proyectos dentro de su contexto.

4.2.4. Valoración relativa de subcriterio ambiental

En la Tabla 9 se muestran las valoraciones relativas del subcriterio ambiental. Como se puede observar, el factor de mayor relevancia corresponde a la escasez hídrica de la zona donde se ubica el proyecto, con un 57% de importancia relativa.

Este resultado puede ser motivo de que hoy en día vivimos una crisis de agua a nivel mundial, donde el recurso hídrico es cada vez más escaso y tanto los gobiernos como grupos ambientalistas buscan nuevas formas de proteger este valioso recurso.

Tabla 8: Valoración relativa de subcriterio ambiental

Subcriterio ambiental	Ponderación modelo
Nivel de impacto en etapa de construcción	0,14
Nivel de impacto en etapa de operación	0,10
Escasez hídrica de la zona	0,57
Conservación ambiental de la cuenca	0,19

Fuente: Elaboración propia

Adicional a esto, debemos considerar que el principal objetivo de los embalses es “proveer agua para riego” durante las épocas de sequía con una

seguridad del 85%, de forma que las comunidades cuenten con este recurso de forma constante durante el año. Es por estas razones que los expertos dan mayor importancia a las características del territorio, de forma de dar prioridad a aquellos embalses que se van a construir en zonas de gran escasez.

Ahora, si evaluamos los subcriterios restantes, se puede observar que el segundo factor con mayor relevancia corresponde a la conservación ambiental de la cuenca, con un 19% de valoración relativa. Esto puede deberse a que el impacto generado durante las etapas de construcción y operación depende de la cantidad de especies en conservación en el sector donde esta ubicado el proyecto. Por lo cual, el nivel de impacto del proyecto dependería, indirectamente, del subcriterio de conservación ambiental.

4.2.5. Valoración relativa de subcriterio social

Los resultados de las ponderaciones para el subcriterio social se observan en la Tabla 10, donde vemos que las valoraciones relativas entre los dos subcriterios considerados son bastante similares. Para el caso del nivel de pobreza de la población, vemos que se da una importancia del 58% por sobre las explotaciones de grupos menores, que cuentan con el 42% de ponderación restante.

Tabla 9: Valoración relativa de subcriterio social

Subcriterio social	Ponderación modelo
Nivel de pobreza de la población del territorio	0,58
Explotación de grupos menores	0,42

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior puede ser motivo de que se está dando mayor prioridad al nivel de pobreza que tienen las comunidades aledañas a la obra, esto debido a las externalidades que generan los proyectos de embalses. Además, se debe considerar que en el cálculo de la Rentabilidad Social (VAN Social) de los proyectos, se incluyen variables que refleja el beneficio que obtendrán los agricultores y las industrias de la zona, por lo cual se cree más relevante aspectos sociales relacionados a la comunidad en sí, más que a las actividades económicas de la zona.

No obstante, el subcriterio que refleja la cantidad de pequeños empresarios y grupos menores beneficiados por el proyecto, sigue teniendo una importancia significativa en el modelo.

4.2.6. Valoración relativa de subcriterio económico

Para el caso del subcriterio económico, en la Tabla 11 se observa que el factor con mayor relevancia para el modelo, es la Rentabilidad Social del proyecto (VAN Social), con un 48% de importancia relativa. Este resultado era de esperarse, debido a que a través del VAN Social se obtiene la rentabilidad social del proyecto.

No obstante lo anterior, se observa que el riesgo en la gestión tiene una ponderación bastante alta, con un 36% de valoración. Esto puede ser motivo de que los riesgos que implica la mala gestión en las diversas etapas del proyecto, afectan de forma considerable la rentabilidad de este. Mientras más compleja sea la gestión, mayores serán los costos del proyecto y, por lo tanto, menor será la rentabilidad de este.

Adicional a esto, se perderá tiempo valioso de realización de la obra y, en algunos casos, las obras permanecerán detenidas hasta que los problemas se resuelvan, por lo cual la pérdida de tiempo también es relevante.

Ahora, si evaluamos el caso inverso, observamos que mientras menores sean los riesgos en la gestión, el VAN Social menos se verá afectado.

Por lo cual concluimos que los riesgos en la gestión hacen que, en caso de un mal funcionamiento, los costos del proyecto aumenten y, en caso de un buen funcionamiento, se mantengan constantes. Por lo cual, el riesgo en la gestión afecta negativamente o hace que la Rentabilidad Social permanezca constante.

Tabla 10: Valoración relativa de subcriterio económico

Subcriterio económico	Ponderación modelo
Rentabilidad social	0,48
Sensibilidad del VAN Social	0,17
Riesgo en la gestión	0,36

Fuente: Elaboración propia

Valoración relativa de subcriterio de sensibilidad del VAN Social

En la Tabla 12 se observan los resultados obtenidos para el subcriterio de sensibilidad del VAN Social. Se puede observar que el subcriterio de sensibilidad a la inversión tiene una valoración relativa más alta, con un 73% de ponderación.

Tabla 11: Valoración relativa de subcriterio de sensibilidad del VAN Social

Subcriterio de sensibilidad del VAN Social	Ponderación modelo
Sensibilidad a la inversión	0,73
Sensibilidad a los beneficios totales	0,27

Fuente: Elaboración propia

Esto puede ser motivo de que, en general, los beneficios de los proyectos de embalses están sobrevalorados y una vez construida la obra, tienden a ser menores. Esto ocurre porque en el momento en que se llevan a cabo los estudios y se calculan los beneficios, hay diversos factores que no se pueden observar directamente, pero que a la larga afectan la rentabilidad de estos.

A pesar de que estas estimaciones son referenciales, en el general de los casos, los costos estimados son menores a los costos reales del proyecto, lo cual no se puede saber con certeza hasta que el proyecto es llevado a cabo. Además, hay casos en que se tienen ciertos montos presupuestados para realizar los estudios, pero una vez que el proyecto es llevado a la práctica, se hace necesario realizar nuevos estudios lo cual no solo aumenta los costos, sino que también retrasa el proyecto.

Son pocos los casos en que esto no sucede, se estipula que los beneficios totales están sobrevalorados y, por lo tanto, se les da menor importancia en el modelo.

Valoración relativa de subcriterio de riesgos en la gestión

Para el caso del subcriterio de riesgos en la gestión, en la Tabla 13 observamos que la valoración relativa más alta la obtiene el nivel de compromiso de los beneficiarios, con un 56%.

Este subcriterio mide el compromiso que tienen los beneficiarios del proyecto con la obra, mientras más comprometidos estén, mejores resultados tendrá el proyecto. Dado que las grandes obras de riego buscan estabilizar la capacidad de riego de las comunidades, es que se da mayor importancia a este factor.

Además, si las comunidades beneficiadas están involucradas con el proyecto, mayor presión ejercerán para que el proyecto se lleve a cabo y, por lo tanto, mayor será la disposición a resolver dificultades y avanzar con la obra en los tiempos estipulados.

Tabla 12: Valoración relativa de subcriterio de riesgos en la gestión

Subcriterio de riesgos en la gestión	Ponderación modelo
Nivel de compromiso de beneficiarios	0,56
Complejidad administrativa de las expropiaciones	0,16
Complejidad administrativa del SEIA (incluye PAC)	0,28

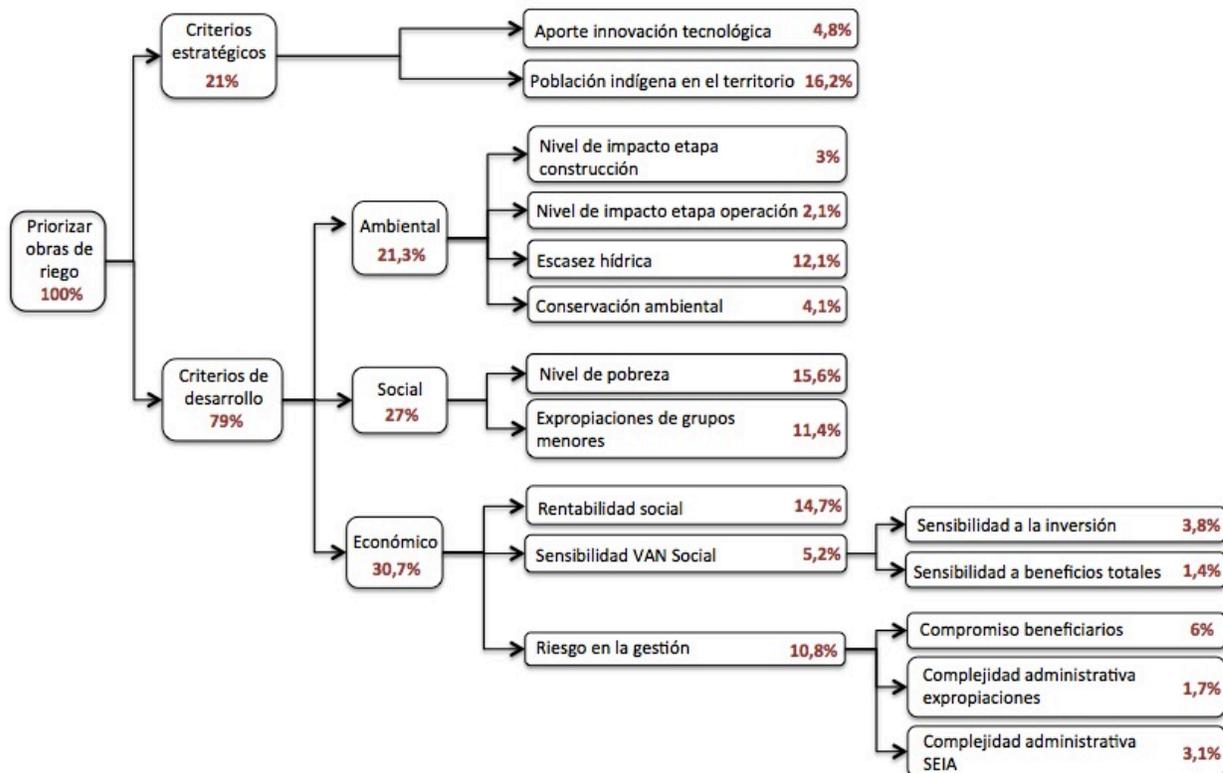
Fuente: Elaboración propia

Adicional a esto, observamos que tanto la complejidad administrativa de las expropiaciones como del SEIA son factores externos al proyecto en sí, por lo cual la importancia que se da a ambos subcriterios es menor (de un 44% entre ambos).

4.2.7. Estructura global de preferencias

A continuación, se presenta el esquema global de preferencias, donde se observan las ponderaciones globales de cada criterio y subcriterio de los distintos niveles del modelo.

Ilustración 12: Árbol estructura global de preferencias



Fuente: Elaboración propia

La estructura global de preferencias en forma gráfica, permite identificar con mayor facilidad aquellos criterios que aunque aceptados como relevantes en el proceso de decisión, emergen con una ponderación marginal. Entre los subcriterios con valoración marginal, se encuentra la sensibilidad a los beneficios totales con un 1,4%, la complejidad administrativa de las expropiaciones con un 1,7% y el nivel de impacto en la etapa de operación con un 2,1%.

Al estudiar los resultados de forma global, se puede ilustrar de mejor manera aquellos criterios que se creían indispensables para el modelo, pero que en la práctica no son tan relevantes. De esta forma se puede retroalimentar a los tomadores de decisión y, eventualmente, revisar el proceso de evaluación de los criterios y subcriterios del modelo.

Cabe destacar que en este caso en particular, los resultados se asemejan a lo esperado, debido a que los factores con ponderaciones marginales son aquellos que se creía que afectaban en menor medida o que, de forma indirecta, estaban relacionados con algún otro subcriterio del modelo.

Finalmente, es importante referirse a los test de consistencia realizados para cada una de las matrices de comparaciones a pares. Los resultados

obtenidos fueron de una Relación de Consistencia (RC) menor al 0.1, lo cual implica que los juicios de los expertos son consistentes, es decir, respetan los principios de transitividad y proporcionalidad.

Capítulo 5: Resultados

"We know very little, and yet it is astonishing that we know so much, and still more astonishing that so little knowledge can give us so much power."

— Bertrand Russell

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación del modelo a cuatro proyectos de embalses en etapas de factibilidad o diseño. Por motivos de confidencialidad, los nombres de los proyectos considerados no son mencionados en el presente estudio. Sin embargo, los datos utilizados son reales, fueron obtenidos a través de información oficial publicada por la DOH y otras instituciones que participan en la evaluación de proyectos hidráulicos de riego.

Adicional a esto, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto que significa el cambio en las ponderaciones de los criterios considerados. Este análisis se realiza sólo para los niveles 2 y 3 del modelo, de forma de estudiar, a grandes rasgos, como cambia la lista priorizada de proyectos respecto de cambios en los criterios macro y de desarrollo.

5.1. Consideraciones previas a la aplicación del modelo

Previa a la aplicación del modelo en los proyectos en estudio, se tomaron ciertas precauciones respecto de los datos utilizados, de forma que los resultados fuesen lo más cercano posible a la realidad.

En primer lugar, se verificaron las fuentes de información y veracidad de los datos utilizados, los cuales fueron obtenidos de diversos documentos oficiales y de las fichas de los proyectos en estudio.

Luego, en caso de no encontrar los datos en documentos oficiales, se conversó con algunos expertos en la materia quienes dieron su opinión respecto de los datos. En base a esta información, se realizaron algunos supuestos para los datos faltantes, con el objetivo de aplicar la herramienta y obtener una vista preliminar del tipo de resultados que se obtienen a través del modelo.

Finalmente, en caso de que los supuestos distorsionaran de forma significativa los resultados, se optó por eliminar estos subcriterios. Para lograr esto, se realizó nuevamente el cálculo de ponderadores en base a las matrices de comparaciones a pares provistas por los expertos. Cabe destacar que se eliminaron sólo aquellos criterios con menor relevancia, es decir, aquellos subcriterios con menos de un 2% de importancia global en el modelo.

A continuación, se detalla la forma de cálculo de los indicadores, fuentes de información y supuestos necesarios.

5.1.1. Subcriterios social

Se tienen dos factores de medición del subcriterio social, los cuales corresponden al nivel de pobreza del territorio y las explotaciones realizadas por grupos menores.

Para el caso del nivel de pobreza, se utiliza el indicador *tasa de pobreza comunal (SAE)*, información obtenida de datos oficiales del Ministerio de Desarrollo Social. Este indicador se estima a través de la tasa de pobreza a nivel comunal como un promedio ponderado entre la tasa de pobreza directa y una tasa de pobreza sintética¹. Los datos considerados corresponden a datos de la encuesta Casen del año 2011 y fueron utilizados aquellos datos correspondientes a la comuna en la cual se localiza el proyecto de embalse [41].

Ahora, para el caso del subcriterio de explotación de grupos menores, se utiliza información del Censo Agropecuario y Forestal del año 2007. En este reporte, se detallan las explotaciones por cantidad de superficie según región, provincia, comuna y distrito. Esta información fue agrupada de acuerdo al tamaño de explotaciones, de la siguiente forma:

1. Explotaciones para subsistencia: Se consideran todas aquellas explotaciones en superficies menores a 1 hectárea.
2. Explotaciones de grupos pequeños: Se consideran todas aquellas explotaciones en superficies de 1 a menos de 20 hectáreas.
3. Explotaciones de grupos medianos: Se consideran todas aquellas explotaciones en superficies de 20 a menos de 100 hectáreas.
4. Explotaciones de grandes grupos: Se consideran todas aquellas explotaciones en superficies de 100 hectáreas o más.

Luego de agrupada la información, se calcula el porcentaje de explotaciones por grupo. Esto fue agregado de acuerdo a cada comuna y, con la información resultante, se calcula el indicador el cual muestra el porcentaje de superficie explotada para subsistencia, por grupos pequeños y medianos.

Los resultados para cada proyecto de embalse se observan en la siguiente tabla:

Tabla 13: Datos proyectos de embalses, subcriterio social

	Embalse A	Embalse B	Embalse C	Embalse D
Tasa de pobreza comunal	26,7%	15,7%	26,7%	15,5%
Explotación grupos menores	65,4%	2,4%	2,4%	1,7%

Fuente: Elaboración propia

¹ La tasa de pobreza sintética es estimada mediante información secundaria proveniente de registros administrativos y datos censales asociados a la comuna.

5.1.2. Subcriterio económico

Se tienen cuatro factores de medición del subcriterio económico, los cuales corresponden al IVAN Social, el compromiso de los beneficiarios con el proyecto, la complejidad administrativa de las expropiaciones y la complejidad administrativa del SEIA.

Para el caso del IVAN Social, se obtuvo la información de las fichas oficiales de los proyectos, actualizadas al mes de septiembre del 2013. En estos documentos se especifica el VAN Social y la inversión social necesaria para llevar a cabo cada proyecto de embalse. A través de ambos valores se calcula el indicador IVAN Social.

Para medir el compromiso de los beneficiarios se utiliza el porcentaje de aporte privado en etapas de inversión. La información respecto de las fuentes de inversión se encuentra especificada en las Fichas IDI¹, donde se detallan los montos de aporte que han recibido los proyectos y la fuente de donde proviene dicho financiamiento. A través de esta información se calcula el porcentaje de aporte que los beneficiarios del proyecto invirtieron en las distintas etapas.

Para el caso de la complejidad administrativa de las expropiaciones, se obtuvo la información de las fichas oficiales de los proyectos actualizadas al mes de septiembre del 2013. En estos documentos se detalla la cantidad de comunidades (ya sean casas aisladas o pueblos) necesarios de reasentar por motivos del proyecto y, en base a los datos, se obtiene el nivel de complejidad.

Para medir el nivel de complejidad administrativa del SEIA se revisaron los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) publicados en el sitio oficial del Servicio de Evaluación Ambiental. Allí se detalla el tiempo que se ha demorado en ser evaluado el EIA y la cantidad de revisiones y solicitudes de información adicional que ha requerido el proyecto.

Dado que el único proyecto que cuenta con esta información corresponde al Embalse B, se supone igual complejidad administrativa del SEIA para el resto de los embalses. De esta forma, todos los proyectos cuentan con la misma complejidad y así ninguno es sobre o subvalorado respecto a este indicador.

Los resultados para cada proyecto de embalse se observan en la siguiente tabla:

¹ Ficha IDI: Ficha de Iniciativa de Inversión. Contiene el detalle del proyecto, con detalle de las actividades a realizar, calendario de financiamiento de los últimos años, plazos y recomendaciones.

Tabla 14: Datos proyectos de embalses, subcriterio económico

	Embalse A	Embalse B	Embalse C	Embalse D
IVAN (Social)	1.096,9	147,35	767,95	397,06
% aportado por privados	0,0%	66,3%	68,7%	0,0%
Nivel complejidad de expropiaciones	0	1	1	3
Complejidad administrativa SEIA	3	3	3	3

Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Subcriterio ambiental

Se tienen cuatro factores de medición del subcriterio ambiental, los cuales corresponden al nivel de impacto en etapas de construcción y operación, la escasez hídrica de la zona y la conservación ambiental del territorio.

Para el caso de la escasez hídrica, el equipo consultor a cargo del proyecto elaboró un índice de escasez hídrica. Este indicador fue calculado en base a los derechos de agua, donde la DGA ha establecido zonas de prohibición y zonas de restricción para el otorgamiento de derechos. Dependiendo de la localización del proyecto y de las características de la zona, se asignó el valor correspondiente¹.

Ahora, para el caso de la conservación ambiental del territorio, se realizó un procedimiento similar al que se utilizó para el indicador de escasez hídrica. Actualmente, el MMA tiene definidos aquellos sitios de conservación biótica y, según las características del lugar donde el proyecto se localiza y su distancia a sitios prioritarios, se asignan valores correspondientes.

Para el caso del nivel de impacto en las etapas de construcción y operación, se realizó un supuesto en donde el mayor nivel de impacto ocurre en la etapa de construcción de la obra. Este supuesto está basado en el hecho de que, para la construcción de los embalses, se requiere de movimiento de tierra, se ven afectados los caminos, las comunidad de la zona, se produce gran cantidad de ruido y contaminantes en el lugar de construcción, entre otros factores.

Para determinar el nivel de impacto se revisaron las fichas de los proyectos donde se especifica que los embalses en estudio se encuentran situados en localidades lejanas a las comunidades y, en general, los grupos que deben ser reasentados son menores.

Dado que ningún proyecto de embalse cuenta con esta información, se supone igual nivel de impacto. De esta forma, todos los proyectos cuentan con el mismo nivel y así el estudio no se ve perjudicado por falta de información.

¹ Valores del indicador especificados en el capítulo de Modelo de priorización, donde se detallan los subcriterios e indicadores.

Los resultados para cada proyecto de embalse se observan en la siguiente tabla:

Tabla 15: Datos proyectos de embalses, subcriterio ambiental

	Embalse A	Embalse B	Embalse C	Embalse D
Nivel impacto etapa construcción	2	2	2	2
Nivel impacto etapa operación	1	1	1	1
Escasez hídrica	0,75	0,25	0,75	0,25
Conservación ambiental	0,0	0,26	0,0	0,60

Fuente: Elaboración propia

5.1.4. Criterio estratégico

Se tienen dos factores de medición del subcriterio ambiental, los cuales corresponden al aporte de innovación tecnológica y la cantidad de población indígena en el territorio.

Para el caso de la cantidad de población indígena en el territorio, se utilizó la información del Censo del año 2002, realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE). En este documento se especifica la cantidad de persona de cada una de las etnias identificadas en el país, por comuna. Utilizando esta información y el total de habitantes, se calcula el porcentaje de población indígena en cada comuna.

Para el caso del aporte de innovación tecnológica se obtuvo la información del documento oficial "Proyectos de riego" publicado por la DOH a comienzos de este año. En dicho documento se especifican los tipos de innovación tecnológica que se están aplicando actualmente en los proyectos de embalses a nivel nacional. Estas nuevas tecnologías son recientes y, por lo tanto, aún no es posible observar los aportes generados al utilizar estas herramientas.

Sin embargo, parte del equipo consultor del proyecto ha realizado un monitoreo de la cuenca donde se ubica el Embalse D mediante el programa WEAP¹, lo cual corresponde a los primeros resultados mediante la innovación tecnológica en proyectos de riego.

Los resultados para cada proyecto de embalse se observan en la siguiente tabla:

Tabla 16: Datos proyectos de embalses, criterio estratégico

	Embalse A	Embalse B	Embalse C	Embalse D
Aporte innovación tecnológica	0	0	0	1
% población indígena	0,44%	14,5%	0,44%	0,53%

Fuente: Elaboración propia

¹ WEAP: Water Evaluation And Planning system. Es un sistema de soporte para la toma de decisiones en términos de la gestión integrada de los recursos hídricos y el análisis de políticas. Esta herramienta permite simular la demanda de agua, suministro, infiltración, necesidad de riego de los cultivos, entre otros.

5.2. Aplicación modelo de priorización a grandes obras de riego

En la tabla 17 se resumen los datos de los cuatro proyectos de embalses mencionados anteriormente.

Tabla 17: Datos proyectos de embalses evaluados

	Embalse A	Embalse B	Embalse C	Embalse D
Impacto etapa construcción	2	2	2	2
Impacto etapa operación	1	1	1	1
Escasez hídrica	0,75	0,25	0,75	0,25
Conservación ambiental	0,00	0,26	0,00	0,60
Pobreza	26,7%	15,7%	26,7%	15,5%
Explotación grupos menores	2,4%	65,4%	2,4%	1,7%
IVAN	1.096,9	147,35	767,95	397,06
Compromiso beneficiarios	68,7%	0,00%	66,3%	0,00%
Complejidad expropiaciones	1	0	1	3
Complejidad SEIA	3	3	3	3
Innovación tecnológica	0	0	0	1
Etnia	0,44%	14,5%	0,44%	0,53%

Fuente: Elaboración propia

De forma preliminar, se puede observar que los Embalses A y C tienen información similar en varios de los indicadores considerados. Esto se produce debido a que ambos proyectos están ubicados en la misma comuna y, por lo tanto, todos los indicadores que se miden a nivel comunal serán los mismos.

También se observa que el Embalse B, beneficia en su gran mayoría a grupos menores y, además, corresponde al proyecto con mayor cantidad de población indígena de los cuatro embalses incluidos en el estudio.

Otro aspecto importante a considerar es el hecho de que el Embalse A tiene el mayor VAN Social de los cuatro proyectos, lo cual corresponde a aproximadamente 7 veces mayor rentabilidad social que el Embalse B.

5.2.1. Resultados obtenidos para embalses en estudio

Posterior a la selección y cálculo de los indicadores a considerar en el modelo, se obtiene el índice multi-criterio (IMC) para los cuatro embalses considerados en el estudio. En la Tabla 18 se resume esta información, donde se especifica el embalse, la prioridad y el IMC que se obtuvo para cada uno de los proyectos¹.

¹ En el Anexo E se muestra en detalle el procedimiento mediante el cual se obtuvieron estos resultados. Allí se pueden observar los datos generales de los embalses, los indicadores en bruto, los indicadores "más es mejor" (donde todos aquellos indicadores que afectan negativamente son transformados en su inversa), los indicadores normalizados, los indicadores ponderados y el IMC.

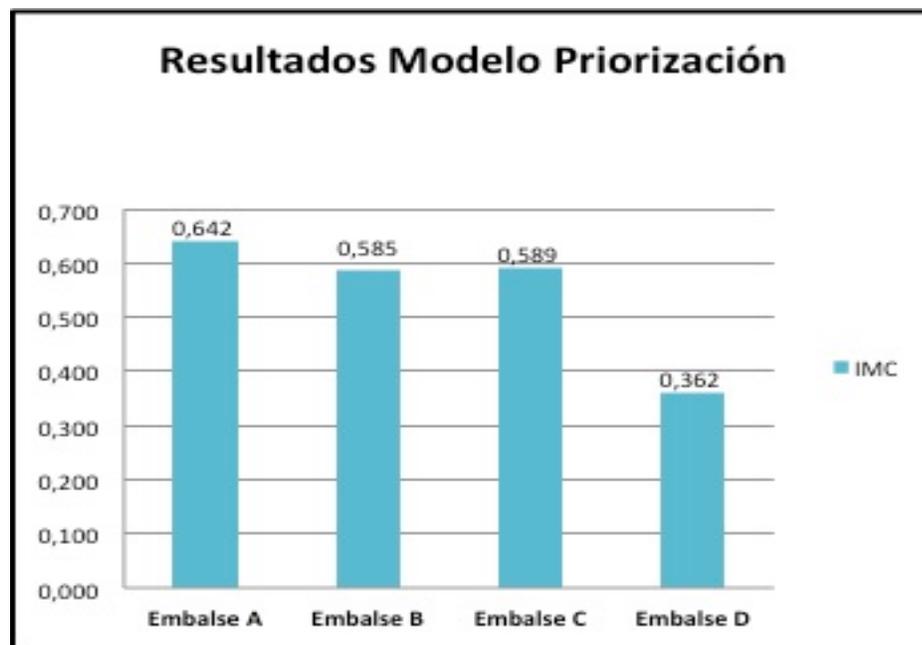
Tabla 18: Priorización de embalses a través del modelo

Embalse	Prioridad	IMC
Embalse A	1	0,642
Embalse C	2	0,589
Embalse B	3	0,585
Embalse D	4	0,362

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de la ilustración 13, se observan los resultados de la priorización de los cuatro proyectos de embalses, a través del modelo propuesto. En primer lugar de la lista jerárquica se encuentra el Embalse A, con un IMC de 0,642; en segundo lugar se encuentra el Embalse C con un IMC de 0,589; muy cercano a este tenemos el embalse B con un IMC de 0,585; y, finalmente, tenemos el Embalse D con un IMC de 0,362, puntaje más bajo de los cuatro embalses.

Ilustración 13: Gráfico de embalses priorizados a través de modelo (IMC)



Fuente: Elaboración propia

Si comparamos estos resultados con los datos de la Tabla 19, donde se esbozan los resultados obtenidos de la priorización mediante VAN Social, vemos que el Embalse B sube de nivel jerárquico sobrepasando al Embalse D. La diferencia que existe entre el VAN Social del Embalse B y el resto de los proyectos es muy marcada, ya que su valor es cerca de seis veces menos que el valor del Embalse D. En base a esto, se puede decir que el modelo de priorización recoge información adicional de los proyectos y permite que tanto los beneficios como las externalidades negativas que estos generan, sean incluidas dentro de la priorización.

Tabla 19: Priorización de embalses a través del VAN Social

Embalse	Prioridad	VAN Social
Embalse A	1	54.408.286
Embalse C	2	51.603.000
Embalse D	3	47.464.200
Embalse B	4	7.024.838

Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Análisis de sensibilidad

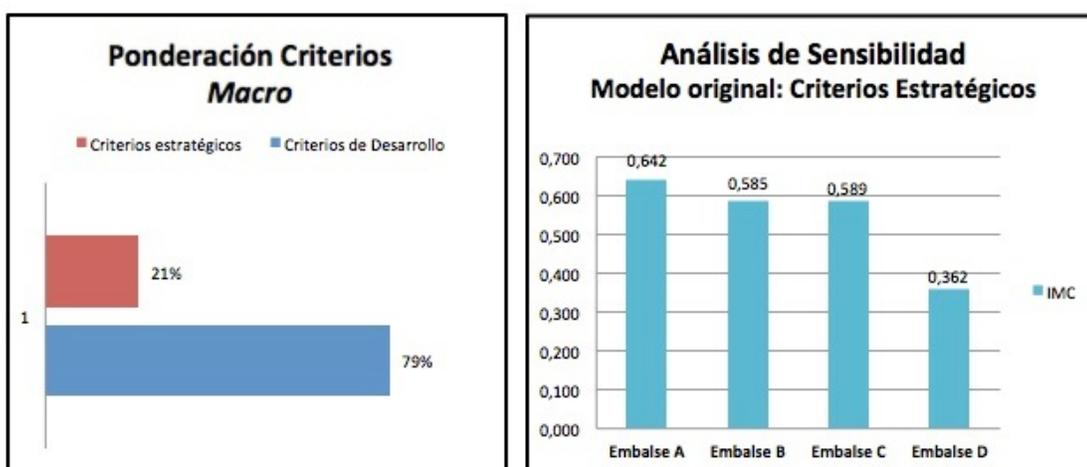
El análisis de sensibilidad es una técnica que permite evaluar posibles variaciones de los elementos del modelo que, en función de alguno de los criterios considerados, genere que uno de los proyectos sea preferible por sobre otro. Este método se considera como una primera aproximación al análisis de riesgos del modelo, ya que permite detectar aquellos elementos que son más sensibles ante una variación.

Para el presente caso de estudio, primero se evalúan las variaciones en el segundo nivel del modelo, el cual corresponde a los criterios *macro*. Luego, se comentan las variaciones en los criterios de desarrollo del tercer nivel del modelo de priorización.

Análisis de Sensibilidad: Criterios *macro*

En la Ilustración 14, se observa el gráfico con la priorización original a través del modelo, donde se especifican los ponderadores de los criterios *macro*.

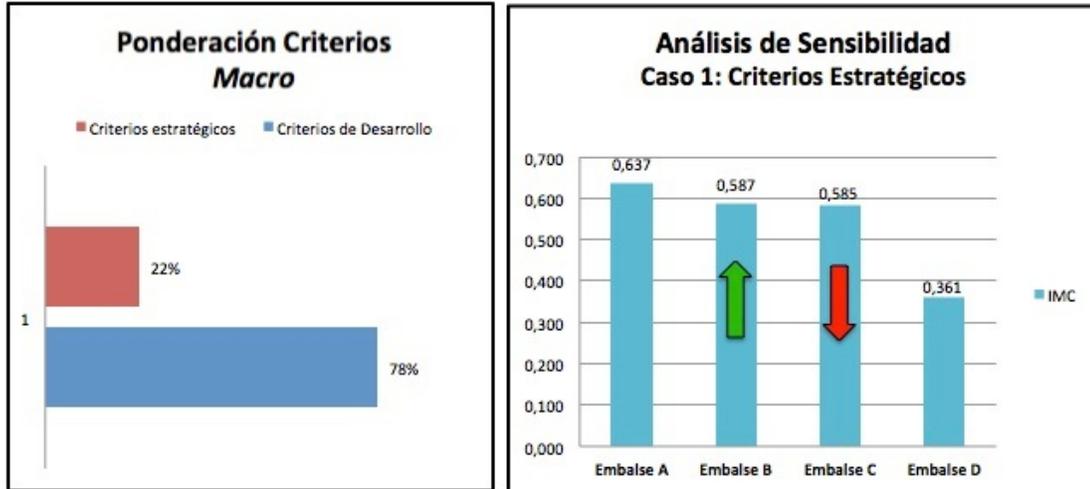
Ilustración 14: Modelo original - Criterios *macro*



Fuente: Elaboración propia

La primera variación del IMC de los proyectos se observa cuando el criterio de desarrollo disminuye un 1% (de 79% a 78%), punto en el cual el Embalse B sobrepasa al Embalse C, lo cual implica que el ranking resulta bastante sensible. Esto se observa en el gráfico de la ilustración 15.

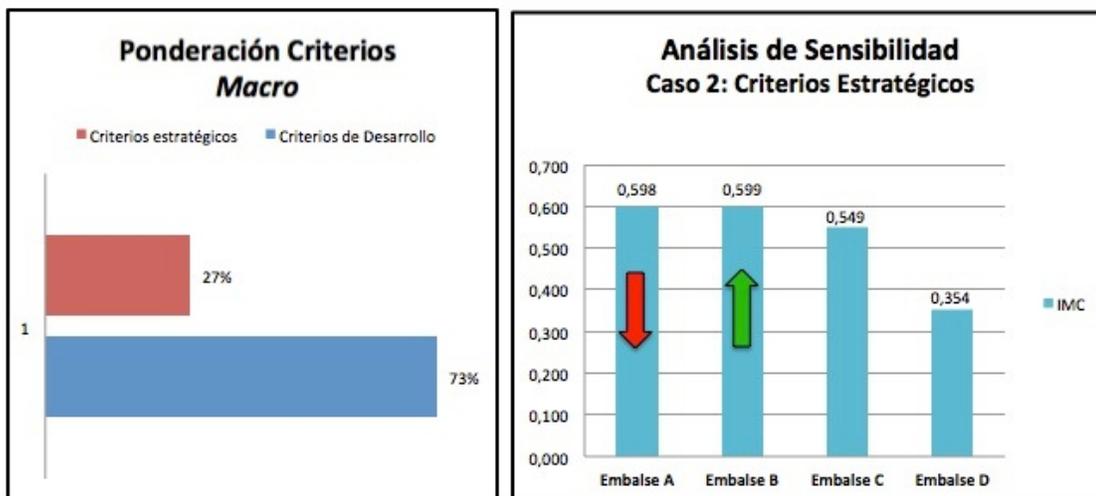
Ilustración 15: Análisis de Sensibilidad 1 - Criterios *macro*



Fuente: Elaboración propia

El segundo cambio de preferencias ocurre cuando el criterio de desarrollo disminuye un 6% (de 79% a 73%), punto en el cual el Embalse B sobrepasa al Embalse A, quedando en primer lugar de priorización. El detalle se observa en el gráfico de la ilustración 16.

Ilustración 16: Análisis de Sensibilidad 2 - Criterios *macro*

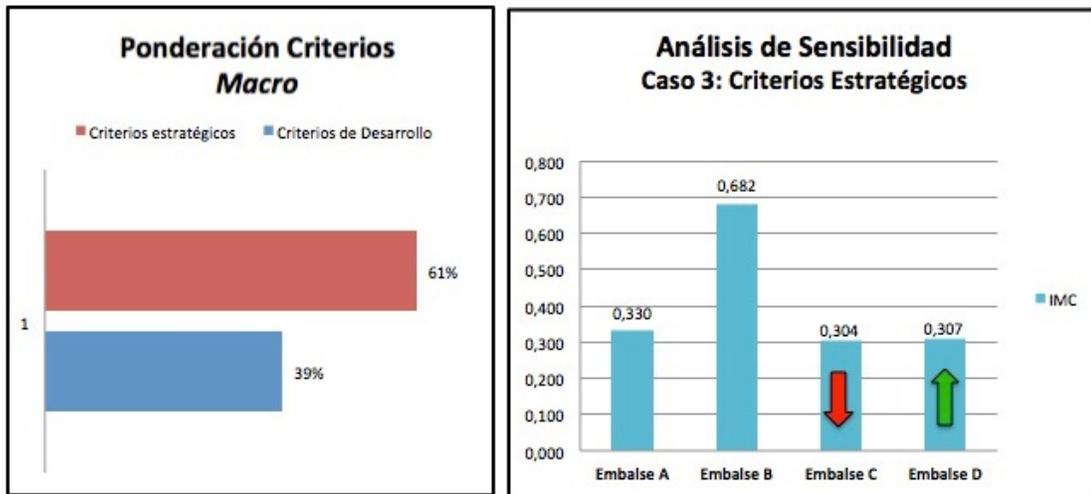


Fuente: Elaboración propia

La tercera variación de preferencias entre los proyectos en estudio ocurre cuando el criterio estratégico (61%) sobrepasa al criterio de

desarrollo (39%), punto en el cual el Embalse D sobrepasa al Embalse B. Esto se puede observar en el gráfico de la ilustración 17.

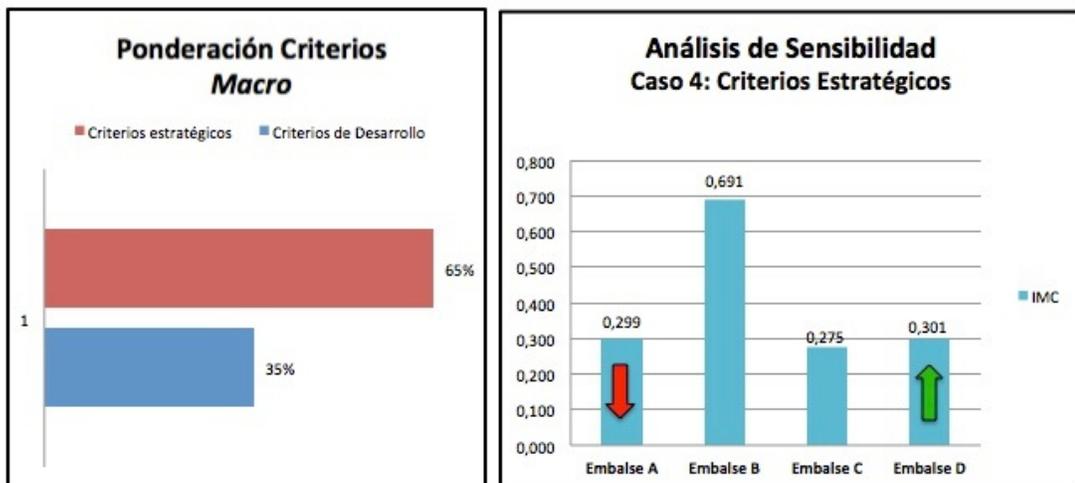
Ilustración 17: Análisis de Sensibilidad 3 - Criterios *macro*



Fuente: Elaboración propia

El último cambio de preferencias ocurre cuando el criterio estratégico aumenta aún más que el caso anterior, quedando con una ponderación del 65%. En este punto el Embalse D sobrepasa al Embalse A, quedando en segundo lugar de priorización, lo cual se observa en el gráfico de la ilustración 18.

Ilustración 18: Análisis de Sensibilidad 4 - Criterios *macro*

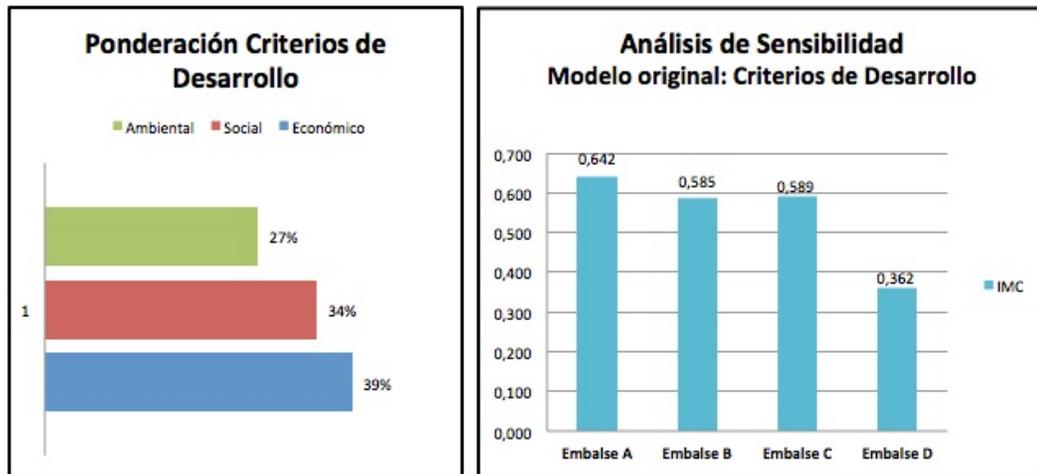


Fuente: Elaboración propia

Análisis de Sensibilidad: Criterios de Desarrollo

Ahora, evaluamos los cambios que provocan variaciones en los criterios de desarrollo para el modelo de priorización. Para lograr esto, se realizarán variaciones en uno de los tres subcriterios, variando de forma proporcional los dos restantes. En la Ilustración 19, se observa el gráfico con la priorización original a través del modelo para el caso de los criterios de desarrollo.

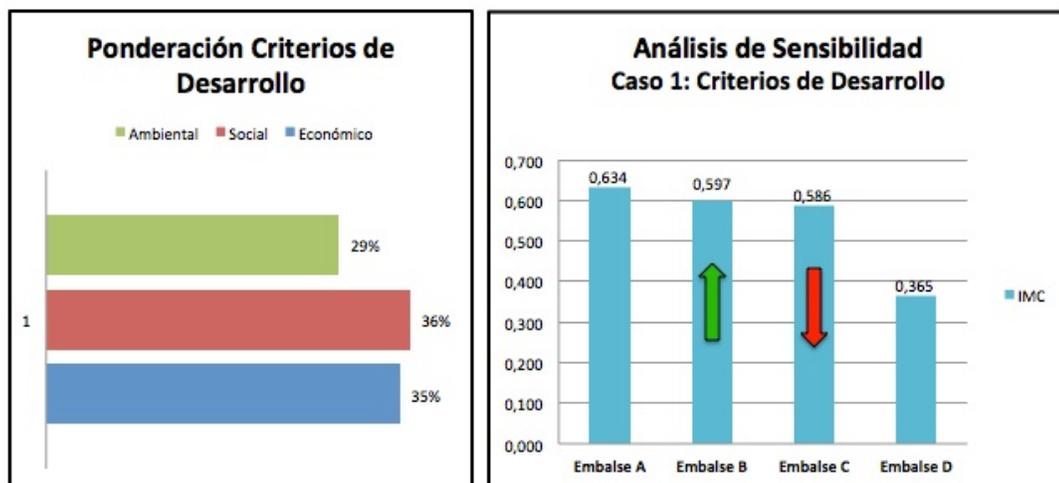
Ilustración 19: Modelo original - Criterios de Desarrollo



Fuente: Elaboración propia

La primera variación se produce cuando el subcriterio económico disminuye en 4 puntos porcentuales (de 39% a 35%), variando de forma proporcional el subcriterio social y ambiental. En este primer cambio observamos que el Embalse B sobrepasa al Embalse C, quedando este en segundo lugar de la lista priorizada, lo cual implica que el ranking resulta ser bastante sensible. Este resultado se observa en la siguiente ilustración:

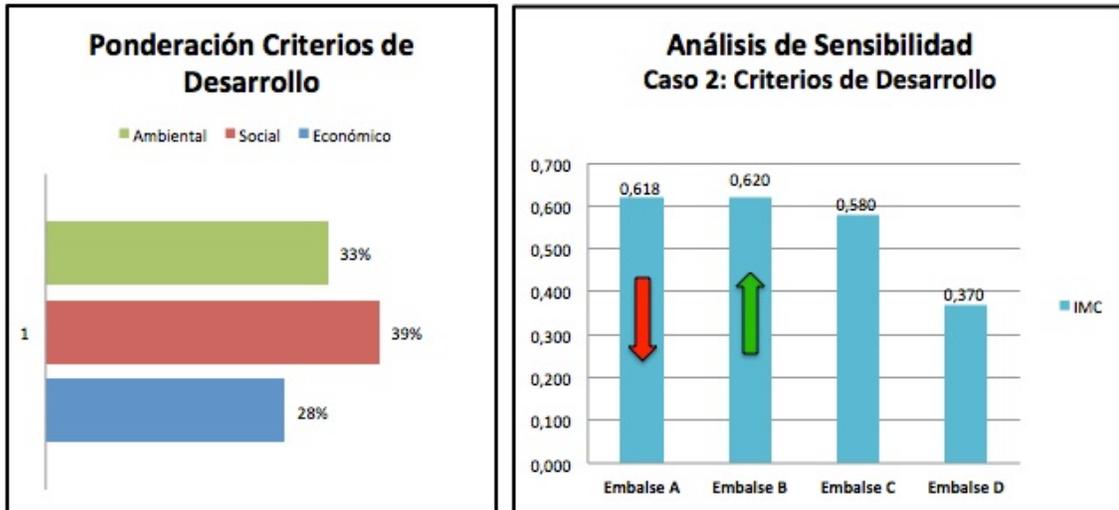
Ilustración 20: Análisis de Sensibilidad 1 - Subcriterio Económico



Fuente: Elaboración propia

La segunda variación ocurre cuando el subcriterio económico disminuye a 26% de la ponderación total del modelo, variando de forma proporcional el subcriterio social y ambiental. En este segundo cambio observamos que el Embalse B sobrepasa al Embalse A, quedando en primer lugar de la lista priorizada. Este resultado se observa en la ilustración 21.

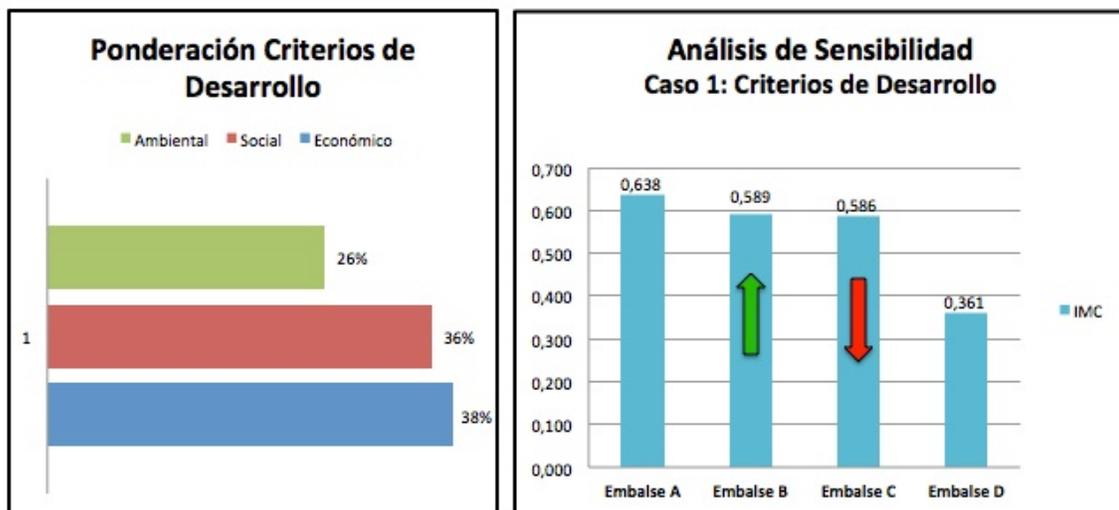
Ilustración 21: Análisis de Sensibilidad 2 - Subcriterio Económico



Fuente: Elaboración propia

Ahora, para el caso del subcriterio social, observamos que la primera variación ocurre cuando este aumenta 2 puntos porcentuales (de 34% a 36%). En este primer cambio observamos que el Embalse B sobrepasa al Embalse C, resultado que se ilustra en el siguiente gráfico:

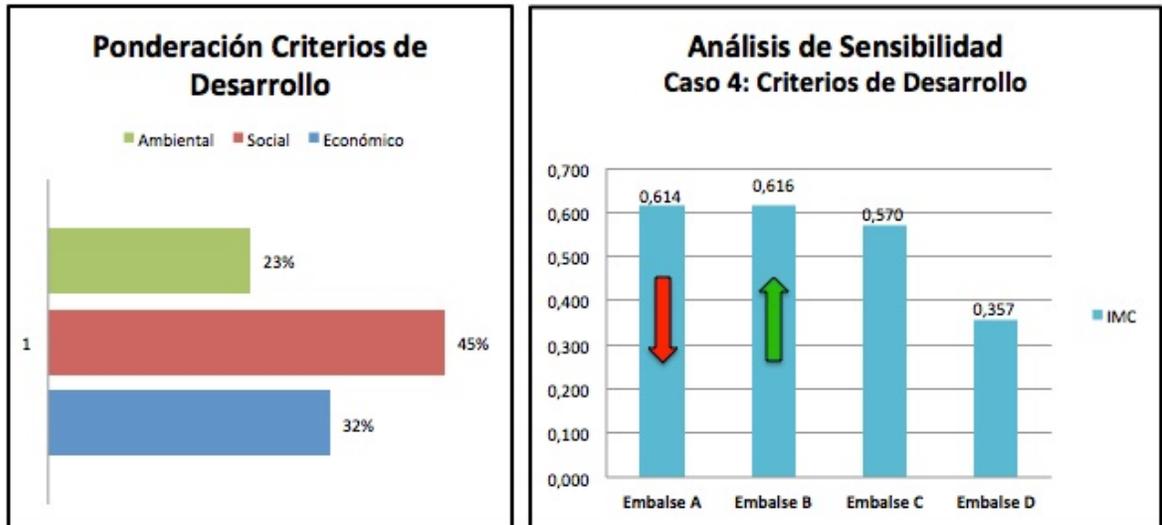
Ilustración 22: Análisis de Sensibilidad 1 - Subcriterio Social



Fuente: Elaboración propia

Luego, la segunda variación del modelo ocurre cuando el subcriterio social aumenta de 34% a 45%, variando los dos subcriterios restantes de forma proporcional. En este segundo cambio se puede ver que el Embalse B sobrepasa al Embalse A quedando en primer lugar de la lista priorizada, resultado que se observa en la ilustración 23.

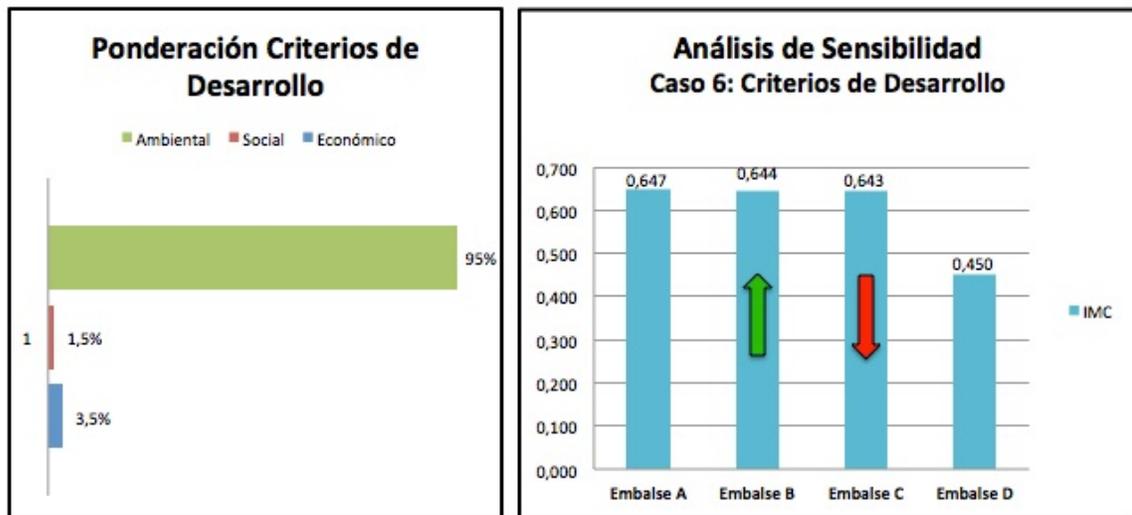
Ilustración 23: Análisis de Sensibilidad 2 - Subcriterio Social



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, evaluamos que sucede al modificar la ponderación del subcriterio ambiental. La primera variación ocurre cuando este subcriterio aumenta de un 27% a un 95% del total de la ponderación, variando los dos subcriterios restantes de forma proporcional, lo cual implica que el ranking resulta ser poco sensible. En este cambio se puede ver que el Embalse B sobrepasa al Embalse C quedando en segundo lugar de la lista priorizada. Este resultado se ilustra en el siguiente gráfico:

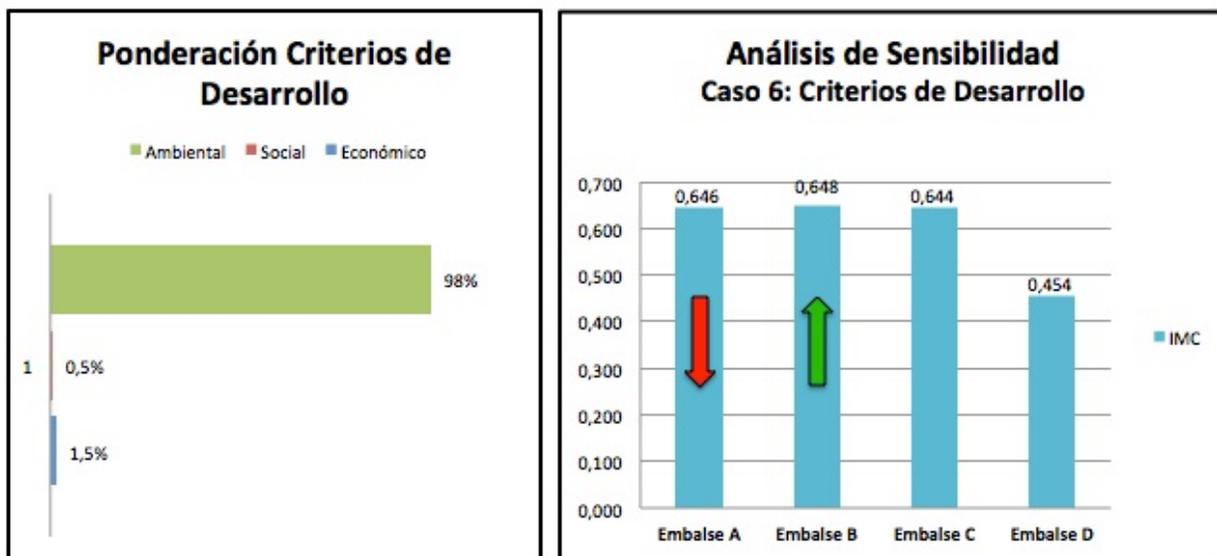
Ilustración 24: Análisis de Sensibilidad 1 - Subcriterio Ambiental



Fuente: Elaboración propia

Ahora, el segundo cambio se genera cuando el subcriterio ambiental aumenta aún más (hasta el 98% del total de la ponderación), variando los dos subcriterios restantes de forma proporcional. En este cambio se puede ver que el Embalse B sobrepasa al Embalse A quedando en primer lugar de la lista priorizada. Este resultado se observa en la ilustración 25.

Ilustración 25: Análisis de Sensibilidad 2 - Subcriterio Ambiental



Fuente: Elaboración propia

En base a los análisis de sensibilidad realizados, vemos que el modelo es más sensible a variaciones de las ponderaciones de los criterios *macro* del modelo. Esto ocurre debido a que estos factores constituyen el 100% del modelo, mientras que las variaciones internas de los criterios de desarrollo corresponden sólo al 79% del total de ponderación.

Adicional a esto, observamos que dentro del criterio de desarrollo, la mayor sensibilidad ocurre en variaciones del subcriterio económico. Esto debido a que pequeñas variaciones en la ponderación de este subcriterio, provocan cambios significativos en la priorización de los proyectos.

Para el caso del subcriterio social ocurre algo similar, donde pequeñas variaciones provocan modificaciones en el orden jerárquico de los proyectos en estudio. Sin embargo, en este caso se requieren de variaciones mayores que para el caso del subcriterio económico.

Finalmente, se observa que el modelo es menos sensible al subcriterio ambiental, ya que para que ocurran cambios en la priorización de los proyectos, se requiere de variaciones significativas del subcriterio ambiental.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

"If we knew what it was we were doing, it would not be called research, would it?"

— Albert Einstein

6.1. Conclusiones

Los resultados muestran que es necesario priorizar los proyectos hidráulicos de riego dentro de su contexto, ya que este tipo de obras generan un alto impacto, tanto positivo como negativo, en el territorio donde se ubican.

El modelo multicriterio construido tiene una buena capacidad de priorización. Los resultados obtenidos indican que los criterios de desarrollo tienen una valoración relativa, de 79%, mayor que los criterios estratégicos del modelo. Esto nos indica que las características de los proyectos en sí, a juicio del panel de expertos entrevistados, son más relevantes que aquellos aspectos políticos y administrativos.

Además, se observa que, dentro de los criterios de desarrollo, las valoraciones relativas de los subcriterios están alineadas con lo que se esperaba.

El subcriterio económico tiene la ponderación más alta, con un 39% de valoración relativa, lo cual se ajusta a lo esperado. Si un proyecto no es rentable en términos socioeconómicos, entonces no debiese ser llevado a cabo. Esto nos dice que el primer filtro es la rentabilidad social del proyecto, por lo cual, es deseable que la ponderación de este factor sea superior a los subcriterios social y ambiental.

Para el caso del subcriterio social, de los resultados obtenidos observamos que este tiene una valoración relativa (34%) mayor que la del criterio ambiental (27%), lo cual se ajusta a lo que se esperaba. Esto se explica debido a que hoy en día, a pesar de la creciente preocupación de las comunidades por la protección del medio ambiente, el factor social rescata aspectos trascendentales de considerar, como lo es la protección a las comunidades.

No obstante, a pesar de que las valoraciones relativas de los criterios son bastante cercanas a lo esperado, éstas no reflejan del todo las condiciones que tienen los proyectos en conjunto con el territorio donde se desarrollan. Esto ocurre debido a la gran diversidad del país, donde los proyectos de embalses en la zona sur tienen características muy distintas a los de la zona norte. Lo cual confirma la necesidad de segmentar los

proyectos de acuerdo a la zona donde se encuentren, para esto se deben generar modelos con distintas ponderaciones para cada una de estas zonas.

Otro aspecto relevante de considerar, es la metodología utilizada para la valoración de las ponderaciones. En el estudio, se entrevistaron a 12 expertos de diversas instituciones para determinar las valoraciones relativas de los criterios y subcriterios del modelo. Sin embargo, aún faltan expertos de distintas áreas que no fue posible entrevistar para este proyecto, pero que sería beneficioso para futuras aplicaciones del modelo, contar con un panel más amplio y variado de especialistas.

Siendo este trabajo la primera aproximación para priorizar las obras hidráulicas de riego a través de técnicas multicriterio, se considera que tanto los resultados obtenidos como el modelo presentado son un buen punto de inicio para el posterior desarrollo de un modelo más preciso y con mejor capacidad de priorización. Las propuestas de mejoras que se exponen a continuación, podrán ser relevantes para futuras investigaciones.

6.1.1. Conclusiones específicas

Respecto a los objetivos iniciales

Los resultados obtenidos en esta memoria cumplen con el objetivo principal, el cual corresponde al diseño de un modelo de priorización de proyecto hidráulicos a través de técnicas multicriterio, con foco en las grandes obras de riego del país.

Dada la amplia cartera de proyectos que actualmente se están desarrollando en la DOH, no fue posible realizar la aplicación del modelo en la totalidad de las obras del país. No obstante, como una primera aplicación del modelo de priorización, los resultados obtenidos son suficientemente explicativos para poder realizar un análisis certero.

Se cumplen también los objetivos específicos del proyecto, pues se identifican los criterios más relevantes para el modelo, se determinan los ponderadores de cada uno de estos y se obtiene una priorización para los cuatro embalses en estudio.

Respecto a los métodos utilizados

El método AHP tiene una serie de ventajas para la toma de decisiones en proyectos de infraestructura hidráulica. Dada la diversidad de factores que se deben considerar en la evaluación y priorización de proyectos de riego, el AHP se considera una buena metodología para el presente estudio.

No obstante, la dependencia de los juicios de expertos que tiene este método, lo convierte en una metodología difícil de actualizar en caso de ser necesario. Además, es importante considerar que la subjetividad del método, al depender de juicios expertos, puede sesgar el modelo en caso de que los

especialistas no sean elegidos adecuadamente o no tengan los conocimientos necesarios para realizar la comparación.

Respecto a los criterios considerados

Debido a las limitaciones de información que hay respecto de los proyectos de embalses, la determinación de los criterios y subcriterios del modelo se vio restringida por la disponibilidad de información.

Los indicadores considerados fueron obtenidos en base a la información pública de los proyectos, pero algunos de los datos fueron inferidos en base a información secundaria y no de primera fuente. Esto puede haber inducido un sesgo en los datos, provocando una sobre o subvaloración de las alternativas de proyectos.

Adicional a esto, se detectó una falta de información en algunos de los documentos públicos utilizados, lo cual no permite contar con la misma cantidad de datos para todas las obras en estudio. Esto puede ser producto de que cada proyecto de embalse es estudiado y documentado por los gobiernos regionales, lo cual provoca que la información dependa tanto de la institución regional como de la persona encargada de completar cada ficha.

En ese sentido, algunos criterios considerados inicialmente en el modelo, tuvieron que ser descartados, siendo que respondían de forma bastante completa a lo que se estaba buscando.

6.2. Recomendaciones y propuestas de mejoras

De acuerdo a los resultados obtenidos y a las conclusiones expuestas anteriormente, las propuestas de mejoras y recomendaciones para futuros trabajos se exponen a continuación:

Mejorar calidad de los datos

Se propone un plan de acción que involucre dos líneas clave: mejoras en el orden y publicación de la información; y mejoras en el proceso de recopilación de datos e ingreso de la información. La primera corresponde a una medida de contingencia para el corto plazo y la segunda es una medida táctica para el mediano plazo.

En cuanto a la mejora en el orden y publicación de la información, se propone crear una página web oficial donde se publique un compilado con toda la información sobre los distintos proyectos de infraestructura. Hoy en día, la información está contenida en los sitios de las distintas instituciones involucradas en la evaluación de los proyectos, lo cual complejiza el proceso de búsqueda de la información.

A través de esta medida se desea facilitar el acceso a toda la información pública de los proyectos de infraestructura y podría ser beneficiosa para futuras aplicaciones de modelos de priorización. Sin embargo, la dificultad de implementación de esta propuesta radica en que hoy en día las instituciones públicas no están bien coordinadas y la comunicación entre ellas es bastante baja.

En cuanto a las mejoras en el proceso de recopilación de datos e ingreso de la información, se propone capacitar al personal de las oficinas regionales para que las fichas de los proyectos cuenten con todos los datos requeridos a nivel nacional. Es relevante, además, considerar que hoy en día estos formularios están estandarizados, pero en la práctica hay muchos proyectos que no cuentan con datos relevantes. Para esta problemática, se propone establecer restricciones, de forma que las fichas de los proyectos no sean aceptadas por la oficina central si no cuentan con la información mínima requerida.

Estudiar nuevos métodos

Como recomendación para futuras aplicaciones del modelo, se propone estudiar distintos métodos de priorización a través de técnicas multicriterio. Para el presente proyecto, se estudiaron tres métodos de determinación de ponderadores: Método de la entropía, AHP y CRITRIC.

Sin embargo, existen diversos métodos de jerarquización que no se incluyeron en el presente estudio, como son: ELECTRE, PROMETHEE, UTA, entre otros. Sería beneficioso realizar una comparación más profunda de todos los métodos multi-atributo y jerárquicos, de forma de utilizar aquella metodología que responda mejor a las necesidades de la DOH en cuanto a evaluación y priorización de proyectos.

Adicional a esto, se propone incluir en futuros estudios un análisis costo-beneficio respecto de cada método potencial, de esta forma se puede seleccionar en base a análisis y comparaciones más profundas.

Segmentar proyectos

Como recomendación para el uso del modelo de priorización, se propone realizar una segmentación por localización, donde se consideren 3 grandes grupos: grupo norte, grupo centro y grupo sur.

En el grupo norte se considerarán todos los proyectos de embalses localizados entre la I y V región del país, incluyendo además a la XV región de Arica y Parinacota. En el grupo centro, se incluirán los proyectos de embalses localizados entre la VI y VIII región del país, incluyendo además a la Región Metropolitana. Finalmente, el grupo sur estará compuesto por los proyectos de embalses localizados entre la IX y XII, incluyendo además a la

XIV región del país. De esta forma los ponderadores del modelo serán definidos en base a las características de la zona.

Esta propuesta radica en que Chile es un país altamente heterogéneo en términos de las condiciones geográficas, por lo cual las características de los terrenos son bastante diversas.

Un ejemplo importante de considerar sería el hecho de que en la zona norte hay escasez del recurso hídrico, mientras que en la zona sur hay abundancia. En base a esto, se puede inferir que en el modelo de la zona norte la ponderación del subcriterio de escasez hídrica tendrá una valoración relativa más alta que el mismo factor en el modelo de la zona sur.

Entonces, si se segmentan los proyectos de acuerdo a la zona donde estos se localizan, la determinación de los ponderadores será mucho más acertada al contexto de cada obra. De esta forma, se estará respetando las características geográficas y la biodiversidad de las localidades de los proyectos.

No obstante, es necesario indicar que esta propuesta tiene como objetivo diferenciar solo las ponderaciones del modelo. No se propone generar distintos modelos para cada región, sino que se recomienda implementar el mismo modelo con distintas ponderaciones.

Modificar el objetivo del modelo

En base a la recomendación anterior, el objetivo del proyecto debiese ser modificado, ya que al implementar modelos con distintas ponderaciones, la comparación entre estos podría no ser factible.

Se propone considerar como objetivo la priorización de proyectos dentro de cada zona geográfica previamente definida, de esta forma los proyectos serían comparados en igualdad de condiciones.

Capítulo 7: Bibliografía

- [1] «Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile,» [En línea]. Available: <http://www.mop.cl/>. [Último acceso: Julio 2013].
- [2] «Dirección de Obras Hidráulicas,» Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile, [En línea]. Available: <http://www.doh.gob.cl/>. [Último acceso: Julio 2013].
- [3] «Sistema Nacional de Inversión, Ministerio de Desarrollo Social, Gobierno de Chile,» [En línea]. Available: <http://sni.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/quienes-somos/descripcion/>. [Último acceso: Julio 2013].
- [4] Ministerio de Planificación, Subsecretaría, «Informe Final de Evaluación, Programa Sistema Nacional de Inversiones,» Santiago, 2007.
- [5] Consejo de Ministros de la Comisión Nacional de Riego, «Manual para Obras de Aprovechamiento Hidráulico,» Santiago, 2010.
- [6] E.-S. C. & K. S. Lee, Prioritization of Water Management for Sustainability Using Hydrologic Simulation Model and Multicriteria Decision Making Techniques, Seoul, Republic of Korea: Engineering Research Institute, Seoul National University, 2008.
- [7] J. P. y. E. Contreras, Manual Metodológico de Evaluación Multicriterio para Programas y Proyectos, Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), 2008.
- [8] B. YILMAZ, «Multi Criteria Decision Making & Criteria Weighting,» de *Taller de Expertos - Banco Mundial*, Santiago, 2013.
- [9] Department for Communities and Local Government, «Multi-Criteria Analysis: a Manual,» London, 2009.
- [10] G. M. & L. P. D. Diakoulaki, «Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems: The CRITIC Method,» Department of Chemical Engineering, Division II, National Technical University of Athens., Athens, Greece, 1993.
- [11] M. M. & R. Y. A. Afshari, Simple Additive Weighting Approach to Personnel Selection Problem, *International Journal of Innovation, Management and Technology*, Vol. 1, No. 5, 2010.
- [12] Dirección General de Inversión Pública (DGIP), "Guía Metodológica Sectorial para la Formulación y Evaluación de Programas y Proyectos Agrícolas de Sistemas de Riego".
- [13] Thomas L. Saaty, "Decision Making for Leaders: The Analytical Hierarchy

Process for Decisions in a Complex World”, United States, 1986.

- [14] «Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile,» [En línea]. Available: <http://www.minagri.gob.cl/>. [Último acceso: Octubre 2013].
- [15] «Comisión Nacional de Riego», Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile [En línea]. Available: <http://www.cnr.cl/>. [Último acceso: Octubre 2013].
- [16] X. Cai, L. Lasdon & A. M. Michelsen, “Group Decision Making in Water Resources Planning Using Multiple Objective Analysis”, *Journal of Water Resources Planning And Management*, 2004.
- [17] S. Hajkowicz & K. Collins, “A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management”, *Evolving Water Management Organisation*, 2006.
- [18] T. Muthu Nesa Beula et al., “Multiple Criteria Decision Making With Compromise Programming”, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, September 2012.
- [19] B. Yilmaz & N. B. Harmancioglu, “Multi-criteria Decision Making for Water Resource Management: A Case Study of the Gediz River Basin, Turkey”, *Water Research Commission*, 2010.
- [20] Wei Chen et al., “Quality Utility – A Compromise Programming Approach to Robust Design”, *University of Illinois at Chicago*, 1998.
- [21] G. V. Sarma & H. F. Merouani, “Some Difficulties in Applying Interactive Compromise Programming Illustrated by a Recent Method and a Case Study”, *Journal of the Operational Research Society*, 1995.
- [22] Fred S. Azar, “Multiattribute Decision-Making: Use of Three Scoring Methods to Compare the Performance of Imaging Techniques for Breast Cancer Detection”, *University of Pennsylvania*, 2000.
- [23] Pablo Torres, “Aplicación de una metodología multicriterio para la priorización de proyectos de infraestructura hidráulica”, *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago*, 2002.
- [24] Ministerio Secretaria General de la Presidencia, Ley N° 19.300, “Ley de Bases del Medio Ambiente”, 2007.
- [25] Sistema Nacional de Información Ambiental, “Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental”.
- [26] Código de Aguas, Artículo 294.
- [27] «Servicio de Evaluación Ambiental», Gobierno de Chile [En línea]. Available: <http://www.sea.gob.cl/>. [Último acceso: Noviembre 2013].
- [28] Kylie Marie Hyde, “Uncertainty analysis methods for multi-criteria decision analysis”, *University of Adelaide*, 2006.
- [29] O. Bastian, M. Lütz, “Landscape functions as indicators for the development of local agri-environmental measures”, *Saxon Academy of Sciences and*

Humanities, 2006.

- [30] L. Benini, V. Bandini, D. Marazza, A. Contin, "Assessment of land use changes through an indicator-based approach: A case study from the Lamone river basin in Northern Italy", Environmental Management Research Group, Interdepartmental Center for Research in Environmental Science (CIRSA), University of Bologna, Italia, 2010.
- [31] Giuseppe Munda, "Social multi-criteria evaluation: Methodological foundations and operational consequences", Department of Economics and Economic History, Environmental Sciences and Technologies, University of Barcelona, Spain, 2003.
- [32] J. Butler, J. Jia & J. Dyer, "Simulation techniques for the sensitivity analysis of multi-criteria decision models", University of Texas, USA, 1996.
- [33] E. Triantaphyllou & A. Sánchez, "A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making methods", Louisiana State University, EEUU, 1997.
- [34] D. Dalalah, F. AL-Oqla & M. Hayajneh, "Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in multi-criteria analysis of the selection of cranes", Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2010.
- [35] «Ministerio de Desarrollo Social, Gobierno de Chile,» [En línea]. Available: <http://www.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/>. [Último acceso: Diciembre 2013]
- [36] Dirección de Obras Hidráulicas, MOP, "Productos DOH - Obras de Riego", 2013.
- [37] Juan José Miranda, "Gestión de Proyectos - Identificación, formulación y evaluación financiera, económica, social y ambiental de proyectos", 2005.
- [38] SAG, Ministerio de Agricultura, "Pauta de evaluación: Proyecto de embalses", 2011.
- [39] Servicio de Evaluación Ambiental, "Guía para la Evaluación de Impacto Ambiental de la Fase de Construcción de Proyectos", 2012.
- [40] Instituto Nacional de Estadísticas, "Estadísticas Sociales de los Pueblos Indígenas en Chile", Censo 2002.
- [41] Observatorio Social, MDS, "Incidencia de la Pobreza a nivel Comunal, según Metodología de Estimación para Áreas Pequeñas", Chile 2009 y 2011.

Capítulo 8: Anexos

8.1. Anexo A: Detalle documento “Proceso de Toma de Decisiones – Descripción y Análisis Crítico”.

Documento elaborado durante la primera etapa del “Estudio para el Fortalecimiento de la Planeación y Priorización de Acciones de Infraestructura Hidráulica” solicitado por la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP. Dicho documento fue redactado por Marcelo Silva, Ingeniero Comercial y encargado de las actividades socio-económicas de dicho proyecto, el cual se está llevando a cabo por el Departamento de Ingeniería Industrial, en conjunto con el Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica y el Banco Mundial.

En esta primera etapa, se realizó el levantamiento y sistematización de la información que permitirá aplicar la herramienta de priorización a las grandes obras de riego del país, las cuales corresponden a 16 embalses. Para lograr esto, se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- a. Revisión y análisis crítico de los mecanismos actuales de toma de decisiones, actores involucrados y definición del “camino de decisión” con respecto a los proyectos de los productos estratégicos de la DOH.
- b. Análisis crítico del proceso completo de evaluación y decisión sobre la iniciativa de inversión asociado a las etapas pertinentes del ciclo de vida de un proyecto, según el producto estratégico considerado.
- c. Descripción y análisis crítico de la evolución histórica de las metodologías y herramientas usadas en Chile para la planificación y priorización de proyectos de infraestructura y acciones en la gestión del agua (a partir del año 2000).

Para la elaboración de dicho informe, se recopiló información a partir de documentos oficiales de las entidades relacionadas y a través de entrevistas con los actores relevantes de cada institución. Los entrevistados, en esta primera etapa, fueron:

1. Juan Alberto González Ortega, Ingeniero Civil, Coordinador Programas Obras Medianas y Menores, Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) – MOP.
2. Maritza Vergara Vega, Ingeniero Civil Hidráulico, Inspector Fiscal de Estudios, Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) – MOP.
3. Milo Millán Romero, Ingeniero Civil, Jefe División Cauces y Drenaje Urbano, Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) – MOP.
4. Francisco Hargous, Jefe Unidad de Organizaciones de Usuarios y Eficiencia Hídrica, Dirección General de Aguas (DGA) – MOP.

5. Felipe Salamanca Picón, Abogado Resolución de Expedientes, Dirección General de Aguas (DGA) – MOP.
6. María Inés Cartes Martínez, Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Profesional de Apoyo, Dirección General de Aguas (DGA) – MOP.
7. María Pía Rossetti, Subdirectora de Planificación Estratégica, Dirección de Planeamiento (Dirplan) – MOP.
8. Ximena Vallejos Contreras, Analista de Inversiones, Departamento de Inversiones – MDS.
9. Marcia Vallejos Ramos, Analista de Inversiones, Departamento de Inversiones – MDS.

8.2. Anexo B: Extracto informe “Mecanismos de Priorización”

La información expuesta a continuación corresponde a un extracto del documento elaborado por el equipo consultor de la Universidad de Chile, en el cual se detallan las memorias del taller sobre “Mecanismos de Priorización”, aplicado a la toma de decisión de inversión en infraestructura hidráulica.

Dicha actividad se enmarca en un convenio de colaboración técnica entre el Banco Mundial y el Gobierno de Chile, como una iniciativa complementaria al “Estudio de Diagnóstico para el Fortalecimiento de la Planeación y Priorización de Acciones de Infraestructura Hidráulica”, solicitado por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) a la Universidad de Chile.

A continuación se presentan los aspectos de diseño del taller, seguido de los principales mensajes de las presentaciones de los expertos internacionales y el *feedback* recibido por parte de la audiencia.

Aspectos de Diseño del Taller

El objetivo del taller fue presentar los resultados preliminares del proyecto en ejecución, a los actores relevantes en el proceso de toma de decisiones y de desarrollo de proyectos de infraestructura hidráulica. Lo anterior con el fin de recibir sus comentarios y propuestas de elementos de mejora, así como una primera referencia de los indicadores que deberán ser considerados en el proceso de priorización.

La programación del taller estuvo a cargo del Banco Mundial, quienes coordinaron adicionalmente la participación de dos expertos internacionales en “toma de decisiones multicriterio” (MCDM, por sus siglas en inglés). El programa detallado del taller fue elaborado por el mismo Banco Mundial en colaboración con el Equipo Consultor y la Inspección Fiscal del proyecto.

La convocatoria estuvo a cargo de la Inspección Fiscal, y fue dirigida a los actores relevantes para los objetivos del taller. Se envió un oficio de invitación a las autoridades de la Comisión Nacional de Riego (CNR), las Unidades y Departamentos de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), de la Dirección General de Aguas (DGA), y la Dirección de Planificación (DIRPLAN), así como a la Dirección Regional de la Va Región de la DOH y la Intendencia de la Región de Valparaíso. La invitación también se extendió posteriormente al Ministerio de Desarrollo Social.

El taller se ejecutó el día martes 28 de mayo del presente año, desde las 9:00 a 18:20 horas, en las dependencias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile. Asistieron poco más de 40 personas entre profesionales de las distintas instituciones convocadas, los expertos internacionales, los representantes del Banco Mundial y el equipo consultor.

Resumen de Presentaciones

El taller se dividió en 4 módulos donde cada entidad presente expuso sobre diversos aspectos a considerar en el proyecto. A continuación, se presenta un resumen del módulo 3, en el cual los expertos internacionales presentaron su experiencia y sugerencias sobre los métodos multicriterio.

Título de Presentación: "MCDA Background"

Nombre de Expositor: David Yates, National Center for Atmospheric Research, Stockholm Environment Institute (the Water Evaluation and Planning System).

Resumen: Se introduce el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA, por su sigla en inglés), resaltando sus siguientes beneficios: facilita la identificación de actores, la estructuración del proceso de decisión, y la cooperación entre los actores, permite elaborar recomendaciones y legitimar la decisión final. Se destaca el proceso de un MCDA, en cuatro etapas: (1) identificación de alternativas, (2) definición de criterios, (3) definición de pesos o preferencias asociadas a los criterios (subjetivos u objetivos), y (4) ranking o lista priorizada. Se expone como ejemplo la acción de comprar un vehículo, el escenario base lo definen las variables exógenas, que en este caso es la disponibilidad de vehículos en el mercado. Las alternativas corresponden a los distintos vehículos, los criterios pueden ser la eficiencia en combustible, el número de pasajeros, el color, precio, kilómetros recorridos (si es usado), el estilo, entre otros. Sobre la base de las preferencias personales, el comprador otorga pesos a los distintos criterios, marcando las preferencias relativas. Luego, comparando todos los criterios y pesos otorgados, se puede rankear las alternativas comparadas. Se destaca la definición de criterios y de pesos de éstos, como las actividades más delicadas para una buena aplicación.

Título de Presentación: "Multi Criteria Decision Making (MCDM) &Criteria Weighting"

Nombre de Expositor: Barış Yilmaz, Celal Bayar University, Turkey.

Resumen: Se introducen los métodos para la decisión multicriterio. Usualmente un problema de MCDM se puede representar en una matriz de decisión, donde se incorporan las alternativas versus los criterios con sus preferencias predefinidas. Los pasos usualmente utilizados para aplicar un MCDM son (1) definir alternativas de infraestructura; (2) definir los criterios con que se compararán las alternativas y los indicadores que los representarán; (3) otorgar pesos o preferencias a los criterios, que puede ser a través de metodología de pesos objetivos ó subjetivos, resaltando dos casos objetivos como son los métodos Entrophy and CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) y un método subjetivo conocido como el AHP (Analytic Hierarchy Process); y finalmente (4) se debe seleccionar el MCDM, entre los cuales se destacan SAW (Simple Additive Weighting), métodos de distancia como TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), y CP (Compromise Programming), y finalmente métodos outranking como ELECTRE y PROMETEE.

Feedback: reflexiones y comentarios de la audiencia

A lo largo del taller, la audiencia tuvo la oportunidad de hacer consultas y compartir sus reflexiones y comentarios con los expositores de los distintos módulos. A continuación se presentan este feedback organizado según alcances.

Aspectos Institucionales y sobre productos estratégicos:

- Se plantea que los proyectos de riego deben ser considerados como elementos claves para afrontar la sequía.
- Se aclara que la Comisión Nacional de Riego, CNR, aborda la planificación a nivel de cuencas, mientras que la DOH está sólo relacionada con la infraestructura hidráulica.
- Se comenta que la División de Planeamiento del MOP, DIRPLAN, ha desarrollado un proyecto de similares características, donde la priorización se aplica sobre planes de infraestructura, donde cada plan tiene una cartera de proyectos. Esta experiencia se desarrolló a nivel metodológico y actualmente están en proceso de implementación.
- El Banco Mundial comenta que en una experiencia de un proyecto previo, entre las reflexiones finales se concluye que es muy relevante considerar una integración a través de planificación territorial, considerando la gestión a nivel de cuencas. Se enfatiza en la necesidad de migrar desde la mirada de proyectos independientes a una mirada de gestión integral e cuencas.

Sobre levantamiento de procesos de toma de decisión:

- Se resalta que en MDS existen metodologías de evaluación con indicadores económicos de costo-beneficio y costo eficiencia para los 3 productos estratégicos de la DOH.
- Se dejan las siguientes dudas abiertas para el análisis a lo largo de la consultoría:
 - a. Dado que hay criterios distintos para evaluar los 3 productos estratégicos de la DOH, ¿es posible incorporarlos en un mismo MCDA? Los expertos internacionales indican que no han visto experiencias con productos tan distintos.
 - b. Representante del Ministerio de Desarrollo Social deja planteada la duda de la etapa en la que vale la pena hacer la toma de decisión para que el proyecto sea rentable.
 - c. Surge la consulta de si existe una doble contabilidad de los aspectos sociales, al incluir en la matriz de decisión un criterio social para proyectos que ya tienen rentabilidad social.
 - d. Se aclara que la DOH prioriza proyectos, no programas ni planes, por lo que la metodología a desarrollar difiere respecto de lo que ya se ha realizado para DIRPLAN. La aproximación desde la lógica de proyectos es distinta a la mirada desde Planes o Programas. No obstante se plantea que la metodología a desarrollar para la DOH, debe guardar consistencia con la metodología de DIRPLAN

Sobre las metodologías MCDA:

- Se plantea la duda de cuál es la objetividad de los métodos objetivos de MCDA. El experto responde indicando que este tipo de metodologías se basa en datos duros y observados, no es una aproximación cualitativa. Por ello el término "objetivo".
- Se enfatiza la necesidad de enfocar los esfuerzos en la definición de los criterios a utilizar ya que el resultado se puede ver influenciado por la buena o mala elección de ellos. El experto internacional asiente con esta afirmación, indicando que efectivamente si un criterio está mal definido puede llegar al extremo de sesgar la priorización, entregando siempre la preferencia a un producto o proyecto.
- Dada la relevancia de definir bien un criterio, se pregunta por la diferencia entre un criterio bien o mal identificado (se da el ejemplo de Palm Beach). El experto responde que como regla general no se debiese poner una característica de un proyecto dentro de los criterios.
- Los expertos internacionales aclaran que un escenario corresponde a la condición base, exógena al proceso de toma de decisión, mientras que las alternativas corresponden al set de productos sobre los cuales se está decidiendo. En estricto rigor se aplica el MCDA sobre las alternativas.

- Producto de que no todos los criterios son igual de relevantes, ¿se debiesen utilizar ponderadores distintos para cada alternativa? Los expertos asienten.
- Se resalta la necesidad de contar con un grupo de construcción de “pesos” bien constituido, debido a que la subjetividad de algunos puede afectar los criterios bien establecidos desde el principio.
- David Yates propone usar como criterios el “Triple bottom line”, esto es: criterios económicos (de análisis costo beneficio), criterios sociales, y criterios ambientales.
- Rémi Trier propone establecer una jerarquización secuencial: primero jerarquizar por separado dentro de cada línea de productos estratégicos (Riego, aguas lluvias y defensas fluviales) con criterios específicos, más bien técnicos de cada uno de ellos, para luego pasar a una priorización global con criterios más generales (en esta segunda priorización podría pensarse en el “Triple bottom line”).
- Se plantea por parte de los consultores que al ser el objetivo generar un modelo de priorización que de cuenta de los intereses de distintas autoridades dentro del proceso de toma de decisión, aparece como recomendable la alternativa de AHP que permite incorporar las visiones subjetivas de cada uno de estos tomadores de decisiones. Aparentemente hay consenso al respecto.

8.3. Anexo C: Descripción de subcriterios e indicadores ambientales

8.3.1. Nivel de impacto en las etapas de construcción y operación

Definiciones [24]:

1. *Estudio de Impacto Ambiental*: el documento que describe pormenorizadamente las características de un proyecto o actividad que se pretenda llevar a cabo o su modificación. Debe proporcionar antecedentes fundados para la predicción, identificación e interpretación de su impacto ambiental y describir la o las acciones que ejecutará para impedir o minimizar sus efectos significativamente adversos.
2. *Evaluación de Impacto Ambiental*: el procedimiento, a cargo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente o de la Comisión Regional respectiva, en su caso, que, en base a un Estudio o Declaración de Impacto Ambiental, determina si el impacto ambiental de una actividad o proyecto se ajusta a las normas vigentes.

3. *Impacto Ambiental*: la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.

Reglamento [25]¹:

1. Proyectos susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus etapas, que deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, son:
 - a. Embalses significativos que requieren aprobación del Director General de Aguas, donde se consideran presas cuyo muro tenga una altura igual o superior a cinco metros o que generen un embalse con una capacidad igual o superior a cincuenta mil metro cúbicos (50.000 m³) [26].
2. ¿Declaración o Estudio de Impacto Ambiental?
El titular del proyecto que se somete al SEIA (Servicio de Evaluación Ambiental) lo hace presentando una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), salvo que dicho proyecto genere o presente alguno de los siguientes efectos, características o circunstancias, caso en el cual deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) [25].
 - a. Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones y residuos.
 - b. Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluido el suelo, agua y aire.
 - c. Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de los grupos humanos.
 - d. Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.
 - e. Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.
 - f. Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

NOTA: De acuerdo a una revisión de las características de los proyectos de grandes obras de riego, se llega a la conclusión de que todos los embalses tienen un muro con altura superior a los 5 metros, por lo cual este tipo de obras requieren Estudios de Impacto Ambiental.

¹ La información contenida en este ítem corresponde a extractos del "Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental". Dado que esta información fue obtenida del reglamento oficial, es expuesta de manera textual a como se encuentra en dicho documento.

3. Los Estudios de Impacto Ambiental consideran las siguientes materias:
 - a. Descripción del proyecto o actividad.
 - b. Línea de base.
 - c. Descripción de efectos, características o circunstancias que dan origen a la necesidad de efectuar un Estudio de Impacto Ambiental.
 - d. Predicción y evaluación del impacto ambiental del proyecto o actividad, incluidas las eventuales situaciones de riesgo.
 - e. Las medidas que se adoptarán para eliminar o minimizar los efectos adversos del proyecto y las acciones de reparación que se realizarán.
 - f. Plan de seguimiento de las variables ambientales relevantes que dan origen al Estudio de Impacto Ambiental.
 - g. Un plan de cumplimiento de la legislación ambiental aplicable.
4. Calificación del Estudio de Impacto Ambiental:
 - a. En caso de ser favorable, será acompañada de los permisos o pronunciamientos ambientales que puedan ser otorgados en dicha oportunidad por los organismos del Estado.
 - b. Si el responsable de cualquier proyecto presenta, junto al Estudio de Impacto Ambiental, una póliza de seguro que cubra el riesgo por daño al medio ambiente, podrá obtener una autorización provisoria para iniciar el proyecto. El reglamento determinará el beneficiario, requisitos, forma, condiciones y plazo del respectivo contrato de seguro.
5. El Estudio de Impacto Ambiental será aprobado si cumple con la normativa de carácter ambiental y, haciéndose cargo de los efectos, características o circunstancias.
6. Resolución: El proceso de evaluación concluirá con una resolución que califica ambientalmente el proyecto, la que deberá ser notificada a las autoridades administrativas. Si la resolución es favorable, certificará que se cumple con todos los requisitos ambientales aplicables, incluyendo los eventuales trabajos de mitigación y restauración. Si, en cambio, la resolución es desfavorable, estas autoridades quedarán obligadas a denegar las correspondientes autorizaciones o permisos.

Aspectos generales:

1. Descripción del embalse: La descripción del proyecto ingresado al SEIA, ya sea como Declaración de Impacto Ambiental o como Estudio de Impacto Ambiental, debería incluir antecedentes sobre el embalse [38]:

- a. Superficie topográfica total del embalse, del área actual de la caja del río del tramo a inundar y del área nueva a ser inundada por el proyecto.
- b. Cota mínima y máxima de inundación (msnm).
- c. Capacidad de acumulación (volumen promedio).
- d. Definir si se efectuará corta de la vegetación de toda el área de inundación, o solo del área de fluctuación o de borde del embalse.
- e. Período mínimo y máximo estimado de la inundación del embalse (llenado del embalse).
- f. Época (estación o meses) del período de llenado del embalse.
- g. Fluctuación entre el nivel mínimo y nivel máximo del embalse.

8.4. Anexo D: Cálculo de ponderadores del modelo

8.4.1. Compilado respuestas de expertos¹

Nivel 2:
Criterios Macro

¿Cuánto supera en importancia el objetivo de la fila al objetivo de la columna?	Criterios de desarrollo	Criterios estratégicos
Criterios de desarrollo	1	3 2/3
Criterios estratégicos	1/4	1

Nivel 4:
Subcriterios asociados a "Criterio Estratégicos"

¿Cuánto supera en importancia el objetivo de la fila al objetivo de la columna?	Aporte innovación tecnológica	Población indígena en el territorio
Aporte innovación tecnológica	1	2/7
Población indígena en el territorio	3 1/2	1

Nivel 3:
Subcriterios asociados a "Criterios de Desarrollo"

¿Cuánto supera en importancia el objetivo de la fila al objetivo de la columna?	Ambiental	Social	Económico
Ambiental	1	3/4	5/7
Social	1 1/3	1	6/7
Económico	1 2/5	1 1/6	1

¹ Los datos representados en las ilustraciones corresponden al compilado de respuestas obtenido a través de los juicios de expertos, los cuales fueron agregados utilizando la fórmula de la media aritmética según se sugiere en el modelo AHP. Estos valores están expresados en fracciones, de acuerdo a la escala de importancias relativas definida por Thomas L. Saaty (Tabla 1).

Nivel 4:
Subcriterios asociados a criterio "Ambiental"

¿Cuánto supera en importancia el objetivo de la fila al objetivo de la columna?	Nivel de impacto etapa construcción	Nivel de impacto etapa operación	Escasez hídrica	Conservación ambiental
Nivel de impacto etapa construcción	1,0	1,9	0,2	0,6
Nivel de impacto etapa operación	0,5	1,0	0,2	0,7
Escasez hídrica	4,7	5,6	1,0	2,9
Conservación ambiental	1,6	1,5	0,3	1,0

Nivel 4:
Subcriterios asociados a criterio "Social"

¿Cuánto supera en importancia el objetivo de la fila al objetivo de la columna?	Pobreza de la población del territorio	Explotación por grupos menores
Pobreza de la población del territorio	1,0	1,4
Explotación por grupos menores	0,7	1,0

Nivel 4:
Subcriterios asociados a criterio "Económico"

¿Cuánto supera en importancia el objetivo de la fila al objetivo de la columna?	Rentabilidad Social	Sensibilidad del VAN Social	Riesgo en la Gestión
Rentabilidad Social	1	3 1/9	1 2/9
Sensibilidad del VAN Social	1/3	1	1/2
Riesgo en la Gestión	5/6	2	1

Nivel 5:
Subcriterios asociados a "Sensibilidad del VANs"

¿Cuánto supera en importancia el objetivo de la fila al objetivo de la columna?	Sensibilidad a la inversión	Sensibilidad a los beneficios totales
Sensibilidad a la inversión	1	2 3/4
Sensibilidad a los beneficios totales	1/3	1

Nivel 5:
Subcriterios asociados a "Riesgo en la gestión"

¿Cuánto supera en importancia el objetivo de la fila al objetivo de la columna?	Compromiso de beneficiarios	Complejidad administrativa de las expropiaciones necesarias	Complejidad administrativa del SEIA (incluye PAC)
Compromiso de beneficiarios	1	2 4/7	2 2/3
Complejidad administrativa de las expropiaciones necesarias	2/5	1	4/9
Complejidad administrativa del SEIA (incluye PAC)	3/8	2 2/7	1

8.4.2. Cálculo de ponderadores y test de consistencia¹

Nivel 2: Criterios "macro"

ITERACIÓN 1

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Criterios de desarrollo	Criterios estratégicos
Criterios de desarrollo	2,00	7,37
Criterios estratégicos	0,54	2,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 1
9,37	0,79
2,54	0,21

11,92

ITERACIÓN 1

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Criterios de desarrollo	Criterios estratégicos
Criterios de desarrollo	8,00	29,50
Criterios estratégicos	2,17	8,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 2
37,50	0,79
10,17	0,21

47,67

TEST DE CONSISTENCIA

	Criterios de desarrollo	Criterios estratégicos
Vector suma de filas	1,27	4,69
Vector propio traspuesto	0,79	0,21

Lambda: $V \cdot B$	2,000	< 0,1
ICM	0,000	
RC	0,000	

¹ Para el cálculo de ponderadores se realizaron dos iteraciones debido a que los resultados fueron obtenidos en la segunda iteración. Todos los cálculos fueron realizados utilizando el procedimiento matemático especificado en el ítem de modelo AHP del capítulo de marco conceptual.

Nivel 4: Criterio estratégico

ITERACIÓN 1

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Aporte innovación tecnológica	Población indígena en el territorio
Aporte innovación tecnológica	2,00	0,58
Población indígena en el territorio	6,94	2,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 1
2,58	0,22
8,94	0,78
11,52	

ITERACIÓN 2

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Aporte innovación tecnológica	Población indígena en el territorio
Aporte innovación tecnológica	8,00	2,30
Población indígena en el territorio	27,77	8,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 2
10,30	0,22
35,77	0,78
46,08	

TEST DE CONSISTENCIA

	Aporte innovación tecnológica	Población indígena en el territorio
Vector suma de filas	4,47	1,29
Vector propio traspuesto	0,22	0,78

Lambda: V*B	2,000	< 0,1
ICM	0,000	
RC	0,000	

Nivel 3: Criterio de desarrollo

ITERACIÓN 1

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Ambiental	Social	Económico
Ambiental	3,00	2,36	2,09
Social	3,83	3,00	2,66
Económico	4,32	3,39	3,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 1
7,44	0,27
9,49	0,34
10,72	0,39
27,65	

ITERACIÓN 1

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Ambiental	Social	Económico
Ambiental	27,04	21,22	18,79
Social	34,47	27,04	23,95
Económico	38,93	30,54	27,04

Suma filas	VECTOR PROPIO 1
67,05	0,27
85,47	0,34
96,52	0,39
249,03	

TEST DE CONSISTENCIA

	Ambiental	Social	Económico
Vector suma de filas	3,71	2,93	2,57
Vector propio traspuesto	0,27	0,34	0,39

Lambda: V*B	3,001	< 0,1
ICM	0,001	
RC	0,000	

Nivel 4: Subcriterio ambiental**ITERACIÓN 1**

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Nivel de impacto etapa construcción	Nivel de impacto etapa operación	Escasez hídrica	Conservación ambiental
Nivel de impacto etapa construcción	4,00	6,03	0,99	3,18
Nivel de impacto etapa operación	2,92	4,00	0,70	2,18
Escasez hídrica	16,81	24,59	4,00	12,47
Conservación ambiental	5,55	8,00	1,30	4,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 1
14,20	0,14
9,79	0,10
57,87	0,57
18,85	0,19
100,72	

ITERACIÓN 2

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Nivel de impacto etapa construcción	Nivel de impacto etapa operación	Escasez hídrica	Conservación ambiental
Nivel de impacto etapa construcción	67,96	98,12	16,28	50,94
Nivel de impacto etapa operación	47,17	68,19	11,31	35,39
Escasez hídrica	275,50	397,90	66,05	206,67
Conservación ambiental	89,56	129,37	21,48	67,21

Suma filas	VECTOR PROPIO 2
233,30	0,14
162,06	0,10
946,12	0,57
307,61	0,19
1649,09	

TEST DE CONSISTENCIA

	Nivel de impacto etapa construcción	Nivel de impacto etapa operación	Escasez hídrica	Conservación ambiental
Vector suma de filas	7,77	10,01	1,74	5,21
Vector propio traspuesto	0,14	0,10	0,57	0,19

Lambda: V*B	4,051	< 0,1
ICM	0,017	
RC	0,019	

Nivel 4: Subcriterio social

ITERACIÓN 1

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Nivel de pobreza de la población del territorio	Explotaciones por grupos menores
Nivel de pobreza de la población del territorio	2,00	2,74
Explotaciones por grupos menores	1,46	2,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 1
4,74	0,58
3,46	0,42
8,20	

ITERACIÓN 2

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Nivel de pobreza de la población del territorio	Explotaciones por grupos menores
Nivel de pobreza de la población del territorio	8,00	10,95
Explotaciones por grupos menores	5,84	8,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 2
18,95	0,58
13,84	0,42
32,79	

TEST DE CONSISTENCIA

	Nivel de pobreza de la población del territorio	Explotaciones por grupos menores
Vector suma de filas	1,73	2,37
Vector propio traspuesto	0,58	0,42

Lambda: V*B	2,000	
ICM	0,000	
RC	0,000	< 0,1

Nivel 4: Subcriterio económico

ITERACIÓN 1

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Rentabilidad Social	Sensibilidad del VAN Social	Riesgo en la Gestión
Rentabilidad Social	3,00	8,66	4,00
Sensibilidad del VAN Social	1,05	3,00	1,39
Riesgo en la Gestión	2,28	6,54	3,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 1
15,66	0,48
5,45	0,17
11,83	0,36
32,93	

ITERACIÓN 2

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Rentabilidad Social	Sensibilidad del VAN Social	Riesgo en la Gestión
Rentabilidad Social	27,24	78,12	36,06
Sensibilidad del VAN Social	9,50	27,24	12,57
Riesgo en la Gestión	20,58	59,03	27,24

Suma filas	VECTOR PROPIO 2
141,43	0,48
49,32	0,17
106,86	0,36
297,60	

TEST DE CONSISTENCIA

	Rentabilidad Social	Sensibilidad del VAN Social	Riesgo en la Gestión
Vector suma de filas	2,14	6,11	2,72
Vector propio traspuesto	0,48	0,17	0,36

Lambda: V*B	3,007	
ICM	0,003	
RC	0,000	< 0,1

Nivel 5: Subcriterio de sensibilidad del VAN Social**ITERACIÓN 1**

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Sensibilidad a la inversión	Sensibilidad a los beneficios totales
Sensibilidad a la inversión	2,00	5,52
Sensibilidad a los beneficios totales	0,73	2,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 1
7,52	0,73
2,73	0,27
10,24	

ITERACIÓN 2

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Sensibilidad a la inversión	Sensibilidad a los beneficios totales
Sensibilidad a la inversión	8,00	22,07
Sensibilidad a los beneficios totales	2,90	8,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 2
30,07	0,73
10,90	0,27
40,97	

TEST DE CONSISTENCIA

	Sensibilidad a la inversión	Sensibilidad a los beneficios totales
Vector suma de filas	1,36	3,76
Vector propio traspuesto	0,73	0,27

Lambda: V*B	2,000	
ICM	0,000	
RC	0,000	< 0,1

Nivel 5: Subcriterio de riesgo en la gestión

ITERACIÓN 1

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Compromiso de beneficiarios	Complejidad administrativa de las expropiaciones necesarias	Complejidad administrativa del SEIA (incluye PAC)
Compromiso de beneficiarios	3,00	11,21	6,46
Complejidad administrativa de las expropiaciones necesarias	0,94	3,00	1,91
Complejidad administrativa del SEIA (incluye PAC)	1,63	5,52	3,00

Suma filas	VECTOR PROPIO 1
20,66	0,56
5,85	0,16
10,15	0,28
36,67	

ITERACIÓN 2

¿Cuánto supera la fila a la columna?	Compromiso de beneficiarios	Complejidad administrativa de las expropiaciones necesarias	Complejidad administrativa del SEIA (incluye PAC)
Compromiso de beneficiarios	30,10	102,87	60,16
Complejidad administrativa de las expropiaciones necesarias	8,77	30,10	17,55
Complejidad administrativa del SEIA (incluye PAC)	15,00	51,42	30,10

Suma filas	VECTOR PROPIO 2
193,12	0,56
56,41	0,16
96,51	0,28
346,05	

TEST DE CONSISTENCIA

	Compromiso de beneficiarios	Complejidad administrativa de las expropiaciones necesarias	Complejidad administrativa del SEIA (incluye PAC)
Vector suma de filas	1,76	5,85	4,10
Vector propio traspuesto	0,56	0,16	0,28

Lambda: V*B	3,082	< 0,1
ICM	0,041	
RC	0,070	

8.5. Anexo E: Aplicación modelo a proyectos piloto

8.5.1. Información proyectos

1	INFORMACION DE LOS PROYECTOS								
	2	9	10	11	12	13	14	15	19
PROYECTOS DE EMBALSES	REGIÓN	Volumen	SUP. BENEF. (HÁ)	COSTO (M\$)	ETAPA ACTUAL	ETAPA QUE POSTULA	AÑO INICIO	AÑO FIN	VANS (M\$)
Embalse B	XV	17	2.546	47.676	Diseño	Ejecución	2015	2017	7.024.838
Embalse C	IV	50	4.940	67.196	Factibilidad	Diseño	2016	2019	51.603.000
Embalse A	IV	50	3.250	49.604	Factibilidad	Diseño	2016	2019	54.408.286
Embalse D	V	86	4.502	119.539	Diseño	Ejecución	2017	2020	47.464.200

8.5.2. Indicadores

INDICADORES												
1	20	21	22	23	24	25	26	29	31	32	33	34
PROYECTOS DE EMBALSES	Impacto Construc.	Impacto Oper.	Escasez Hídrica	Fragilidad Amb.	Pobreza	Explot.	IVAN	Compromiso de Benef.	Compl. Adm. Expropiaciones	Compl. Adm. SEIA	Inn. Tecnológica	Etnia
Embalse B	2	1	0,25	0,26	0,743	0,654	147,35	0,0000	0	3	0	0,145
Embalse C	2	1	0,75	0,00	0,666	0,024	767,95	0,6633	1	3	0	0,004
Embalse A	2	1	0,75	0,00	0,666	0,024	1096,9	0,6871	1	3	0	0,004
Embalse D	2	1	0,25	0,60	0,653	0,017	397,06	0,0000	3	3	1	0,005

8.5.3. Indicadores "más es mejor"

INDICADORES "MAS ES MEJOR"												
1	20	21	22	23	24	25	26	29	31	32	33	34
PROYECTOS DE EMBALSES	Impacto Construc.	Impacto Oper.	Escasez Hídrica	Fragilidad Amb.	Pobreza	Explot.	IVAN	Compromiso de Benef.	Compl. Adm. Expropiaciones	Compl. Adm. SEIA	Inn. Tecnológica	Etnia
Embalse B	0,500	1,000	0,250	3,846	0,743	0,654	147,345	0,000	0,000	0,333	0,000	0,145
Embalse C	0,500	1,000	0,750	0,000	0,666	0,024	767,947	0,663	1,000	0,333	0,000	0,004
Embalse A	0,500	1,000	0,750	0,000	0,666	0,024	1096,853	0,687	1,000	0,333	0,000	0,004
Embalse D	0,500	1,000	0,250	1,667	0,653	0,017	397,060	0,000	0,333	0,333	1,000	0,005

8.5.4. Indicadores normalizados

INDICADORES NORMALIZADO												
1	21	22	23	24	25	26	29	31	32	33	34	
PROYECTOS DE EMBALSES	Impacto Oper.	Escasez Hídrica	Fragilidad Amb.	Pobreza	Explot.	IVAN	Compromiso de Benef.	Compl. Adm. Expropiaciones	Compl. Adm. SEIA	Inn. Tecnológica	Etnia	
Embalse B	1,000	0,333	1,000	1,000	1,000	0,134	0,000	0,000	1,000	0,000	1,000	
Embalse C	1,000	1,000	0,000	0,896	0,036	0,700	0,965	1,000	1,000	0,000	0,030	
Embalse A	1,000	1,000	0,000	0,896	0,036	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	0,030	
Embalse D	1,000	0,333	0,433	0,879	0,027	0,362	0,000	0,333	1,000	1,000	0,036	

8.5.5. Indicadores ponderados

INDICADORES PONDERADOS												
1	21	22	23	24	25	26	29	31	32	33	34	
PROYECTOS DE EMBALSES	Impacto Oper.	Escasez Hídrica	Conservación Amb.	Pobreza	Explot.	IVAN	Compromiso de Benef.	Compl. Adm. Expropiaciones	Compl. Adm. SEIA	Inn. Tecnológica	Etnia	IMC
Embalse B	0,021	0,041	0,040	0,092	0,114	0,022	0,000	0,000	0,038	0,000	0,166	0,563
Embalse C	0,021	0,122	0,000	0,156	0,004	0,117	0,074	0,022	0,038	0,000	0,005	0,589
Embalse A	0,021	0,122	0,000	0,156	0,004	0,167	0,077	0,022	0,038	0,000	0,005	0,642
Embalse D	0,021	0,041	0,017	0,091	0,003	0,061	0,000	0,007	0,038	0,048	0,006	0,362