RUTA HACIA LA COMPENSACIÓN EQUIVALENTE DE LA BIODIVERSIDAD DEL BOFEDAL LAGUNILLAS

PLAN DE TRABAJO

ACTUALIZACIÓN MARZO 2025

Elaborado por

Cienciambiental Consultores S.A

- Dr. Antonio Tironi Silva
  ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6796-7422
- MSc. Marcela Torres Gómez
  ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8327-6238
- MSc. Tomás Poch Velasco
- MSc. Héloïse Doligé
- Francisca Soto Santander

Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB):

- Dr. Pablo Guerrero,
  Departamento de Botánica de la Universidad de Concepción
  ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1034-1899
- Dra. Paola Poch,
  ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2593-5315
- Dr. Ricardo Segovia,
  ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8787-619X

ÍNDICE

1 RESUMEN 6
2 PRESENTACIÓN 7
2.1 UN ENFOQUE ECOSISTÉMICO PARA LA COMPENSACIÓN 7
3 OBJETIVO GENERAL 9
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 9
4 CONTEXTO CASO LAGUNILLAS 10
4.1 AVANCES EN LA RESTAURACIÓN 11
4.1.1 DESARROLLO DEL PLAN DE MANEJO DE LAGUNILLAS (2006-2024) 11
4.1.2 AUDITORIAS: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 14
5 UNA RUTA HACIA LA COMPENSACIÓN DEL BOFEDAL DE LAGUNILLAS. 16
5.1 ETAPA 1: DIAGNÓSTICO DE ANTECEDENTES Y EXPECTATIVAS DE LA RUTA 17
5.1.1 REVISIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE ANTECEDENTES DE LA AFECTACIÓN DEL BOFEDAL DE LAGUNILLAS 17
5.1.2 IDENTIFICACIÓN DE EXPECTATIVAS DE LA COMPAÑÍA RESPECTO AL PLAN DE COMPENSACIÓN 17
5.2 ETAPA 2: ACTUALIZACIÓN DE LA IMAGEN OBJETIVO 18
5.2.1 CAMBIOS EN DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES CLAVE FRENTE A ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 19
5.3 SELECCIÓN DE BOFEDAL CONTROL 21
5.3.1 PRIMERA SELECCIÓN DE BOFEDAL CONTROL 22
5.3.2 SEGUNDA SELECCIÓN DE BOFEDAL CONTROL 22
5.4 MEDIDAS DE COMPENSACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD 24
5.4.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE BIODIVERSIDAD Y DEFINICIÓN DEL ECOSISTEMA DE REFERENCIA 25
5.4.1.1 Revisión de parámetros de biodiversidad 25
5.4.1.2 Determinar el ecosistema de referencia para Lagunillas. 25
5.4.2 CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO RESIDUAL Y GANANCIA EN BIODIVERSIDAD 26
5.4.3 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES PARA LA COMPENSACIÓN EQUIVALENTE 28
5.5 CRITERIOS PARA CONSTRUIR Y SELECCIONAR LAS ALTERNATIVAS DE COMPENSACIÓN 29
5.5.1 PLANIFICACIÓN SISTEMÁTICA DE LA CONSERVACIÓN: ANÁLISIS MULTICRITERIO 29
5.5.2 ETAPAS DE LA PLANIFICACIÓN SISTEMÁTICA DE LA CONSERVACIÓN 30
5.6 ELABORAR PLAN DE MANEJO ADAPTATIVO 32
5.6.1 ESTÁNDARES ABIERTOS PARA LA CONSERVACIÓN 32
5.6.2 COSTOS DE LOS PROYECTOS DE CONSERVACIÓN 33
5.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 36
6 ANEXOS METODOLÓGICOS 37

6.1 PASO 1: IDENTIFICAR LAS VARIABLES OBTENIDAS EN ESTUDIOS PREVIOS COMO INSUMOS PARA ESTIMAR LA AFECTACIÓN SOBRE LAGUNILLAS 37

6.2 PASO 2: DETERMINAR UN ECOSISTEMA DE REFERENCIA Y LOS ATRIBUTOS BIÓTICOS Y ABIÓTICOS QUE DEBEN SER FOCO DE COMPENSACIÓN 38

6.2.1 ECOSISTEMA DE REFERENCIA 38

6.2.2 ATRIBUTOS DE BIODIVERSIDAD 39

6.3 PASO 3: CALCULO DEL IMPACTO RESIDUAL (IR), GANANCIA EN BIODIVERSIDAD (GB) Y GANANCIA NETA EN BIODIVERSIDAD 40

6.4 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DE COMPENSACIÓN EQUIVALENTE 47

6.5 LINEAMIENTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE ACTORES DE LAS ALTERNATIVAS DISPONIBLES . 50

6.5.1 METODOLOGÍA DE MAPEO DE ACTORES: 51

7 METODOLOGÍAS PARA LA DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS OBJETOS DE CONSERVACIÓN DE CADA ALTERNATIVA DE COMPENSACIÓN 56

7.1 OBJETOS DE CONSERVACIÓN 56

7.1.1 INDICADORES A NIVEL ECOSISTÉMICO 56

7.1.1.1 Diversidad taxonómica (TD) 56

7.1.1.2 Diversidad Filogenética (PD) 56

7.1.1.3 Diversidad Funcional (FD) 57

7.1.1.4 Endemismo Taxonómico (WE) 57

7.1.1.5 Endemismo Filogenético (PE) 57

7.1.1.6 Endemismo Funcional (FE) 58

7.1.2 INDICADORES FUNCIONALES 58

7.1.2.1 Condición de la vegetación (sanitaria) 58

7.1.2.2 Servicios Ecosistémicos 58

7.1.3 INDICADORES A NIVEL DE ESPECIE 59

7.1.3.1 Estados de Conservación 59

7.1.3.2 Áreas de ocupación 59

7.1.3.3 Resiliencia Climática 59

7.1.3.4 Distintividad evolutiva 60

8 ANEXO 1 – REVISIÓN HISTÓRICA DE ANTECEDENTES 61

8.1 CONCLUSIONES DE LAS AUDITORÍAS AL PLAN DE MANEJO DE 2016 Y 2023 61

9 ANEXO 3 -VARIABLES MONITOREADAS HISTÓRICAMENTE EN LAGUNILLAS 70

9.1 COMPONENTES Y VARIABLES ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DEL ECOSISTEMA DE REFERENCIA Y LOS ATRIBUTOS DE COMPENSACIÓN EQUIVALENTE 73

FIGURAS

Figura 1. Etapas propuestas para el desarrollo del plan de compensación, con el detalle las actividades consideradas en la etapa de formulación..... 8
Figura 2. Resumen de las principales recomendaciones generadas en la primera auditoría de la recuperación de Lagunillas. La figura destaca las principales acciones recomendadas, ordenadas en 3 marcos principales, agrupadas por tema y señala los vínculos entre ellas, cada flecha indicando qué acción alimenta a otra u otro grupo de acciones. Las líneas gruesas indican las recomendaciones prioritarias..... 15
Figura 3: Una ruta hacia la compensación equivalente del impacto sobre la biodiversidad del bofedal de Lagunillas. 16
Figura 4. Ciclo del Proyecto según estándares abiertos para la práctica de la conservación..... 33
Figura 5. Cambio en la superficie del cuerpo de agua del Bofedal Lagunillas previo y posterior a la realización del proyecto. 37
Figura 6. Jerarquías de la biodiversidad (Modificado de Noss, 1990). 40
Figura 7. Resumen metodológico para aplicación de medidas de compensación equivalentes. Fuente: SEA (2023). 41
Figura 8. Mapa de relevancia de Ecosistemas Terrestres de la región de Tarapacá obtenido desde Geoportal SIMBIO (2023) 42
Figura 9. Mapa de relevancia de humedales de la región de Tarapacá obtenido desde Geoportal SIMBIO (2023). .. 43
Figura 10. Mapa de bofedales altoandinos de Tarapacá (destacados en rojo)..... 47
Figura 11. Estructura de la Matriz de Interés o matriz de Mendelow. 54
Figura 12. Ejemplo diagrama de interacción entre actores del sitio de compensación. 55

TABLAS

Tabla 1. Línea de tiempo con las resoluciones de autorización de extracción de agua..... 10
Tabla 2. Responsabilidades asignadas en la matriz RACI a las diferentes unidades de BHP y CMCC en el desarrollo y seguimiento del plan de compensación ..... ***¡Error! Marcador no definido.***
Tabla 3. Detalle de las metodologías propuestas para abordar cada uno de los pasos y vinculo a anexo metodológico detallado 27
Tabla 4. Tipos de gastos generales asociados a la implementación de un Plan de manejo para la conservación o restauración de la biodiversidad 34
Tabla 5: Costos de la alternativa de compensación equivalente de Lagunillas elaborada hasta la fecha 35
Tabla 6. Multiplicador de relevancia del área de Influencia (M1) 43
Tabla 7. Multiplicador de Localización (M2) 45
Tabla 8. Multiplicador de tiempo requerido para obtener ganancias (M3) 45
Tabla 9. Multiplicador por tipo de protección Legal (M4) 45

Tabla 10. Ejemplo tabla de mapeo de actores 52
Tabla 11. Criterios Climáticos-Hidrológicos y Biológicos del bofedal Lagunillas medidos previo el impacto ambiental hasta la actualidad..... 70
*Tabla 12. Componentes y variables incluidos en la metodología asociada a la caracterización y conservación equivalente de bofedales altoandinos de Chile. Se destacan diferentes componentes de la biodiversidad (*C: Composicional, *E: Estructural y *F: Funcional). 73*

1 RESUMEN

Este documento presenta todos los elementos necesarios para que CMCC construya una ruta hacia la compensación de los impactos residuales sobre la biodiversidad del bofedal de Lagunillas, de acuerdo con los requerimientos de la compañía (*Our Requeriments*) y estándares nacionales (guías SEA) e internacionales (ICMM, CopperMark), entregando un flujo de trabajo y una caja de herramientas metodológicas que permitan construir una serie de alternativas de compensación equivalente, con un enfoque ecosistémico y una perspectiva regional.

Queremos entregar herramientas para los tomadores de decisiones de la compañía para diseñar, evaluar y construir distintos *proyectos de conservación y restauración de la biodiversidad*, que, en su conjunto, configuren distintas **alternativas de compensación** equivalente al impacto sobre Lagunillas.

A la fecha de redacción de este documento se propone una alternativa de compensación compuesta por proyectos de conservación en los ecosistemas de Isluga, Aroma, Penjamo y la hacienda Cancosa, los cuales buscan compensar un **impacto residual** considerando las especies amenazadas y protegidas oficialmente, que han sido afectadas por el ejercicio del Proyecto. El proyecto de restauración en curso en Lagunillas ha podido aumentar exitosamente la superficie de vegetación azonal utilizando los recursos hídricos del sistema de recarga artificial, la que debe ser considerada en la actualización del impacto residual a compensar de esta ruta. Adicionalmente, esta propuesta metodológica define la actualización de la Imagen Objetivo del bofedal de Lagunillas considerando el potencial efecto del cambio climático.

Esta ruta utilizará la "*planificación sistemática* de la conservación" para entregar criterios, información y análisis necesarios para seleccionar las mejores alternativas de compensación, considerando criterios ecológicos, climáticos, sociales y económicos. Este informe va complementado con una serie de anexos metodológicos que buscan describir más en detalle las metodologías disponibles para las distintas etapas requeridas.

Un cambio significativo de esta ruta es la incorporación de las comunidades y otros stakeholders relevantes desde una etapa muy temprana, desde la construcción, definición y selección de cada alternativa. Esto busca alinearse con los últimos estándares comunitarios, de biodiversidad y de pueblos indígenas de la compañía, además de darle viabilidad a esquemas de conservación y/o restauración, en conjunto con estos socios, claves para cualquier iniciativa de compensación a largo plazo en el Altiplano chileno.

Teniendo esto en cuenta, al final de este informe se entregan lineamientos metodológicos para incorporar a otros actores en el diseño y la implementación de la alternativa de compensación seleccionada, además de referencias metodológicas sobre la confección de planes de manejo -con "estándares abiertos para la conservación"- para cada *proyecto de conservación o restauración* que compondrán cada **alternativa de compensación.**

2 PRESENTACIÓN

Durante el año 2021 Minerals Americas desarrolló su Estrategia de biodiversidad y uso del territorio, que tiene como visión: "**un Minerals Americas con resultados positivos para la naturaleza en todos sus activos**".

Alcanzar esta visión involucra compensar los impactos vinculados a impactos históricos (o "*legacy issues*"), por lo cual Minerals Americas y CMCC formulan durante junio de 2023 el proyecto "Ruta hacia la compensación equivalente de la biodiversidad de Lagunillas", con el fin de considerar las acciones de restauración desarrolladas hasta la fecha en el humedal de Lagunillas y orientar las medidas de compensación futura. Desde esa fecha, BHP también ha actualizado sus requerimientos de medio ambiente y de comunidades, y publicó una nueva política de relacionamiento con pueblos indígenas.

Considerando este nuevo enfoque de la compañía hacia la biodiversidad, las comunidades y los pueblos indígenas, este documento contiene nuevos y actualizados lineamientos generales para identificar, priorizar y construir alternativas de compensación equivalente de biodiversidad, y para establecer los criterios y análisis que permitan definir la alternativa más apropiada y viable en términos ecológicos, sociales y económicos, en base a evidencia de calidad.

Además, ayudará a orientar este desafío con una mirada integral y regional, en línea con las metas de BHP, con la legislación vigente y los más altos estándares internacionales (como ICMM[1] y Copper Mark[2], BBOP[3]).

2.1 UN ENFOQUE ECOSISTÉMICO PARA LA COMPENSACIÓN

Este documento plantea los lineamientos para el desarrollo de alternativas de compensación adaptativas y bajo un enfoque por ecosistemas, siguiendo las recomendaciones de la guía para la compensación de biodiversidad en el SEIA[4].

Allí se indica que en los sitios donde se considera compensar se debe comprometer un manejo adaptativo, a través de planes de manejo que permitan una correcta implementación y seguimiento de los proyectos de conservación, incluyendo hitos verificables y reportables, pero flexibles y actualizables para incorporar cambios en los ecosistemas, como los provocados por el cambio climático.

El enfoque por ecosistemas, de acuerdo con la misma guía, corresponde a una estrategia para la gestión integrada de tierras, reconociendo que los ecosistemas no se encuentran aislados y por tanto deben gestionarse considerando su conectividad.

Lagunillas por ejemplo, forma parte un sistema de lagunas altoandinas que entregan conectividad de hábitat a la biodiversidad del altiplano, por tanto se deben desarrollar alternativas de compensación equivalente al impacto

[1] International Council on Mining and Metal (ICMM). Jerarquía de Mitigación ICMM.
[2] Copper Mark (2020). The criteria guide for the risk readiness assessment
[3] Business and Biodiversity Offsets Programme (BBOP). Standard on biodiversity offset
[4] SEA (2022a). Guía teórica para la compensación de biodiversidad en el SEIA.

sobre la biodiversidad en sus distintos niveles, incluyendo la continuidad de hábitat a nivel regional o de la ecozona altoandina[5].

Es importante destacar que este enfoque, no implica una mayor inversión de recursos, sino un cambio de mirada en la búsqueda de alternativas de compensación, sustentada en estándares nacionales e internacionales, criterios ecológicos y metodologías científicas apropiadas para asegurar la concreción de las metas bajo un plan de compensación, con mirada estratégica.

Considerando esto, se recomienda que el desarrollo de la ruta para la compensación de lagunillas se desarrolle en 3 fases: Formulación, Implementación y Seguimiento (Figura 1).

Este documento contiene la fase de formulación de la ruta, donde se presentan los insumos y metodologías para enfrentar la siguiente fase del proyecto. Este documento entrega, (i) una revisión preliminar de la información disponible (estudios, datos y acciones implementadas) en Lagunillas, (ii) metodologías para actualizar y mejorar la estimación del alcance de compensación (impacto residual), considerando los más altos estándares científicos para realizar las estimaciones solicitadas por la autoridad ambiental, (iii) metodologías multicriterio para apoyar la selección de la alternativa de compensación más viable (en términos ecológicos, sociales y económicos), y (iv) una aproximación metodológica para implementar el plan de manejo adaptativo, que guiará cada proyecto de conservación a mediano y largo plazo.

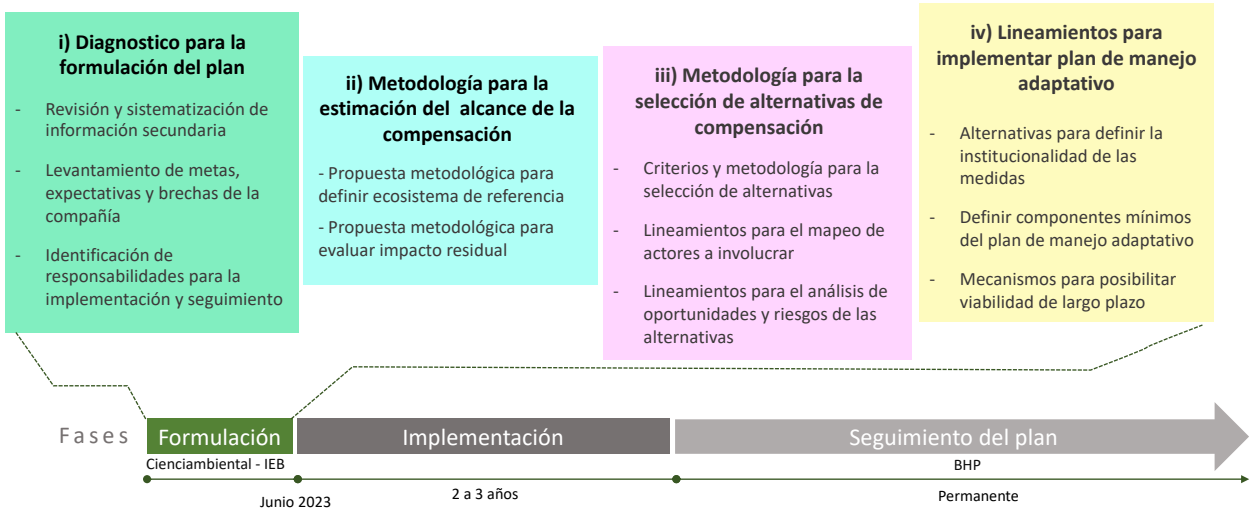

Figura 1. Etapas propuestas para el desarrollo del plan de compensación, con el detalle las actividades consideradas en la etapa de formulación.

[5] Considerando los lineamientos de la guía para la conservación de la biodiversidad en el SEIA (2022), biodiversidad incluye diversidad genética, especies/poblaciones, comunidades o ecosistemas y paisaje.

3 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un plan de trabajo cuya implementación permita identificar, priorizar y construir alternativas de compensación equivalente aplicables al caso del bofedal de Lagunillas, considerando los efectos del cambio climático global sobre los ecosistemas altoandinos.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un diagnóstico de antecedentes y expectativas del plan dentro de la compañía.
- Actualizar imagen objetivo del Plan de Manejo Lagunillas en base a la evolución natural de los bofedales altoandinos de la cuenca, ante diversos escenarios de cambio climático.
- Proponer metodologías para definir un ecosistema de referencia para compensar.
- Presentar metodologías para actualizar el cálculo del impacto residual sobre Lagunillas y ganancias en biodiversidad producto del Plan de compensación.
- Presentar criterios para la construcción, priorización y selección de alternativas de compensación equivalente para Lagunillas.
- Presentar metodologías para la planificación y gestión de las alternativas de compensación.

4 CONTEXTO CASO LAGUNILLAS

Lagunillas se encuentra en la región de Tarapacá, aproximadamente a 138 km al este de Iquique.

Ubicado en el borde noreste de la laguna Huantija, consiste en un Sistema Vegetacional Azonal Hídrico Terrestre (SVAHT) del tipo bofedal, cuya vegetación se sustentaba naturalmente por un acuífero subyacente, complementado por las vertientes de la subcuenca Salar del Huasco[6].

Una serie de falencias en la evaluación de los impactos sobre el medio biótico que provocaría la extracción de agua, y en el seguimiento de algunas de las medidas de mitigación, ocasionaron una pérdida en riqueza de flora y cobertura vegetacional del bofedal, junto a una pérdida de superficie de espejo de agua y los impactos sobre la fauna asociados, entre otros efectos sobre los ecosistemas.

La tasa de extracción de agua desde el acuífero ha sido variable durante la operación desde sus inicios en 1994. Un resumen de estas variaciones se muestra en la sucesión temporal de la Tabla 1:

Tabla 1. Línea de tiempo con las resoluciones de autorización de extracción de agua

ID	Período	Proyecto /Medida	Caudal	Resolución
1	1994 -1997	Exploración de Mina y Planta de Lixiviación	50 L/s	Resolución 0394/1994 del SERNAGEOMIN
2	1997-2002	Proyecto Expansión Cerro Colorado	90 L/s	Resolución N°22/1997 de COREMA
3	2002 - 2015	Mejoramiento de Eficiencia Stretch Plan	150 L/s	R.E. N°102/2002 de COREMA R.E. N°76/2011
	2005	Inicio proceso sancionatorio	-	Resolución Exenta N ° 19/2006, COREMA
4	2015-2019	Proyecto Continuidad Operacional Cerro Colorado	135 L/s	RCA N°69/2015 (parcialmente anulada)
5	2019-2022	Medida voluntaria	108 L/s	Medida voluntaria
6	2022-2023	Régimen cautelar de restricción y cese de extracción de agua para operación	54 -69 L/s	RCA N°13/2022
7	2023-2024	Restricciones Operacionales adicionales	31 - 45 L/s	Fojas 11595 (21/11/2023)

El año 2003 la compañía es adquirida por BHP Billiton y dos años más tarde, comienza un proceso sancionatorio por incumplimiento en el monitoreo de variables ambientales y medidas de mitigación, que finalizó con una sanción por parte de COREMA en 2006 (Res ex N ° 19/2006).

Luego de esto, el año 2008 CMCC presenta el "Plan de Manejo de las funciones ecosistémicas del sistema lacustre de Lagunillas", donde se regulariza el Sistema de Recarga Artificial (SRA) de la Laguna Huantija y se impulsa el desarrollo un nuevo modelo hidrogeológico para la cuenca. Posteriormente, en un proceso de revisión de las RCA otorgadas a CMCC, en 2011 se establece un conjunto de medidas correctivas para cautelar los niveles de agua subterránea de la unidad hidrogeológica Lagunillas (Res Ex N ° 67/2011) [7].

[6] Mapoteca digital Dirección General de Aguas, Subcuencas BNA.
[7] Resolución Exenta N ° digital 2022010013

El conflicto resurgiría en 2015 con la aprobación del proyecto Continuidad Operacional Cerro Colorado (RCA N°69/2015), que fijaba un volumen de extracción de agua de 135 L/s hasta diciembre de 2023[8], retrasando en hasta 25 años el tiempo de recuperación del acuífero comprometido en la RCA N°69/2015 y en la R.E. N°67/2011[7].

Una serie de nuevas reclamaciones generaron la anulación parcial de la RCA N°69/2015[9] el año 2019, en cuanto a las medidas y condiciones para mitigar el impacto ambiental sobre el tiempo de recuperación del acuífero y el bofedal de Lagunillas[7,9].

Desde entonces, CMCC aplicó la medida voluntaria de extraer sólo 108 L/s hasta 2022, cuando se aprueba una medida cautelar para la paralización definitiva de la extracción de agua, a través de un régimen escalonado de restricciones hasta diciembre de 2023, cuando debe cesar la extracción para la operación (RCA N°13/2022)[10]. El último acuerdo de transacción aprobado en noviembre de 2023[11] restringiría aún más la tasa de extracción máxima de la medida cautelar, llegando a los 31 L/s en diciembre del mismo año, después de lo cual CMCC cesaría las extracciones con fines operacionales.

4.1 AVANCES EN LA RESTAURACIÓN

En esta sección, se revisan los avances históricos del desarrollo del plan de compensación del bofedal de Lagunillas.

4.1.1 Desarrollo del plan de manejo de Lagunillas (2006-2024)

Desde el año 2006, el bofedal de Lagunillas cuenta con un Sistema de Recarga Artificial (SRA) que se implementó en el marco del "Plan de trabajo para el manejo de las funciones ecosistémicas del sistema lacustre de lagunillas" (en adelante Plan de Manejo), como medida de mitigación de impactos no previstos sobre el acuífero. En este plan se fijaron indicadores de desempeño bióticos y abióticos para validar el éxito de la restauración en plazos determinados.

Estos parámetros de mantención de características mínimas del sitio, que deben ser permanentes y asegurar la estabilidad del sistema, fueron declarados a partir del año 2011 (R.E. N°67/2011) como la "imagen objetivo" del bofedal, y representaría la condición inicial del bofedal previa al impacto del Proyecto, y a la que apuntarían los resultados de la ejecución del Plan de Manejo.

El Plan de Manejo fue actualizado en octubre de 2015 (RCA N°69/2015) con la aprobación del EIA, incorporando elementos que tenían por finalidad minimizar las incertidumbres asociadas a la ejecución de un plan de recuperación de un ecosistema complejo -como los bofedales altiplánicos- y de largo plazo de ejecución. Esta resolución luego sería retrotraída parcialmente en 2019 (R.E. N°78/2019) hasta la elaboración de un segundo ICSARA donde se ajustarían las medidas y condiciones para mitigar el impacto ambiental del proyecto, dentro del plazo máximo de recuperación según las exigencias dispuestas en la R.E. N°67/2011, contemplando los escenarios proyectados de cambio climático.

[8] Memo interno BHP
[9] Tribunal Ambiental
[10] https://causas.1ta.cl/causes/193/expedient/4530/books/137/?attachmentId=7295
[11] Fojas 11595 Ilustre Primer Tribunal ambiental

Mediante la RCA 13/2022 en enero de 2022, se calificó favorablemente el Proyecto "Continuidad Operacional Cerro Colorado", manteniéndose con él las actividades asociadas al Plan de Manejo de Lagunillas, actualizando indicadores de cumplimiento en función de los resultados de los últimos monitoreos y considerando la aplicación de la variable cambio climático. Esta versión actual del Plan de Manejo del bofedal integra los compromisos de las resoluciones ambientales R.E. N°67/2011, RCA N°69/2015 y RCA N°13/2022.

A pedido de BHP, durante los años 2016 y 2022 se realizaron auditorías independientes[12] para evaluar los Planes de Manejo formulados y su éxito en la recuperación del bofedal de Lagunillas. Ellas tenían por foco identificar sus fortalezas y debilidades, además de formular recomendaciones para mejorar la estrategia de gestión, sus bases conceptuales, metodología, mecanismos de monitoreo y evaluación. Además, se evaluaron los resultados de la restauración y del manejo realizados en el bofedal de Lagunillas hasta la fecha. Los resultados de estas auditorías se sintetizan en el punto 4.1.2.

En marzo de 2023 se entregó una revisión independiente de la actualización del Plan de Manejo[13], que evalúa los métodos de diseño, monitoreo, fijación de metas y los resultados de recuperación de Lagunillas y, en base a las auditorías precedentes, define las mejoras aportadas al plan, subraya sus debilidades y propone acciones de mejora, con mirada a la futura recuperación del bofedal, tal como lo definen la R.E. 67/2011, la RCA 69/2015, la RCA 13/2022.

Paralelamente, en 2013[14] y 2020[15] se efectuaron estudios de acciones compensatorias de biodiversidad para Lagunillas, como requerimiento interno de BHP según lo articulado en sus Requerimientos Estándar de Gestión Ambiental[16].

Estos estudios buscaron generar un plan de manejo que entienda, maneje y protega los sistemas ecológicos azonales asociados a Lagunillas, evitando una pérdida neta de biodiversidad tras los 19 años de operación de CMCC, con acciones efectivas, aceptables, transparentes y duraderas.

Su elaboración comprendía tres objetivos principales: evaluar el impacto residual de las actividades de CMCC en el bofedal, aplicando la jerarquía de mitigación; determinar requisitos y evaluar alternativas de acciones compensatorias; e inferir el alcance de la compensación necesaria en base al valor de la pérdida de biodiversidad. Un último reporte en 2022[17], en el contexto de la construcción del Plan de Cierre en 2024, revisó y corrigió la información previamente reportada, entregando insumos para la elaboración de una estrategia de compensación equivalente en el marco de la Estrategia Nacional de Biodiversidad[18], la Estrategia Regional de Biodiversidad de la

[12] Revisión externa independiente de la Recuperación del Bofedal de Lagunillas Facultad de Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile. 09.04.2016.
[13] Revisión Externa Independiente de la Implementación del Plan de Manejo de Lagunillas, elaborada por Dr Pablo Marquet en dependencias de la UC en Marzo 2023
[14] Estudio de Identificación: Acciones compensatorias de biodiversidad para CMCC, Elaborado por Templado en Octubre 2013.
[15] Actualización de Sitios Potenciales para la Compensación en Biodiversidad del Impacto en Lagunillas para CMCC, elaborado por Templado en Noviembre 2020.
[16] Estándares de Nuestros Requerimientos (BHP), previamente denominados "Documentos a Nivel de Grupo" (GLD)
[17] Reporte de insumos para la Estrategia de Compensación de Lagunillas, elaborado por Templado en Agosto 2022
[18] CONAMA, 2008. Estrategia Nacional de Biodiversidad, Documento Oficial. En: CONAMA, 2008. Biodiversidad de Chile, Logros y Desafíos. Tercera Edición Actualizada. Ocho Libros Editores, Santiago de Chile. pp:585-595.

Región de Tarapacá[19], el Informe Plan de Trabajo para el Manejo de las Funciones Ecosistémicas del sistema Lacustre de Lagunillas[20] y la Guía para la compensación de biodiversidad en el SEIA[21].

BHP, queriendo robustecer el trabajo realizado hasta ahora, incorporando nuevas metodologías de manejo adaptativo e involucrando a sus stakeholders desde etapas tempranas, ha desarrollado esta ruta conceptual, acompañada de insumos metodológicos validados científicamente para implementar la compensación equivalente en Lagunillas, de manera de implementar una compensación viable y socialmente validada a largo plazo.

[19] SEREMI MMA-TARAPACÁ. 2019. Estrategia Regional de Biodiversidad 2019-2030, Región de Tarapacá. Documento técnico de la Secretaría Regional Ministerial de Medio Ambiente, Región de Tarapacá. 67 pp.
[20] CMCC. 2022.Informe Plan de Trabajo Para el Manejo de las Funciones Ecosistémicas del Sistema Lacustre de Lagunillas, Periodo abril de 2021 a marzo de 2022. Compañía Minera Cerro Colorado Ltda. 128 p.
[21] SEA. 2023. Guía Metodológica para la compensación de biodiversidad en ecosistemas terrestres y acuáticos continentales.

4.1.2 Auditorias: Conclusiones y recomendaciones

Principales fuerzas y debilidades

Las auditorías subrayaron la relevancia del trabajo hecho a la fecha para la elaboración de un plan de mitigación del impacto de CMCC en el bofedal de Lagunillas.

De hecho, siendo un estudio pionero, podría servir de referencia para iniciativas futuras en cuanto a restauración y compensación de impacto ambiental desde el sector privado.

La escala a la que fue pensada la estrategia se juzgó adecuada para hacerse cargo del impacto asociado a la operación de CMCC. Esperan que se genere una compensación equivalente y una ganancia neta de biodiversidad.

La estimación del impacto residual de la compañía en el sitio estudiado fue permitida por la disponibilidad de datos de monitoreo fiables, aunque poco sistematizados. Esta disponibilidad de datos también permitió una adecuada identificación de los componentes clave de biodiversidad y de los factores explicativos del impacto residual.

Otro objetivo de la auditoria era la evaluación del resultado de las acciones de mitigación en el área del bofedal de Lagunillas, las cuales fueron estimadas como exitosas en general, entregando conclusiones positivas para la implementación de las siguientes etapas de la estrategia. Por ejemplo, el sistema de recarga artificial implementado desde 2004 y rediseñado en 2006 en la laguna Huantija permitió mantener el espejo de agua a valores superiores a 5.000 m^2 tomando en cuenta las fluctuaciones estacionales naturales, este tamaño siendo el mínimo requerido desde la RCA de 2002.

En cuanto a la cobertura vegetal, se confirma un aumento de la cobertura del bofedal en las áreas beneficiadas por la irrigación artificial, alcanzando un 4.86% de la cobertura total de vegetación propia del bofedal el año 2020, con especies de plantas en cojín representando el 68,2% de esta cobertura. Esto permitió concluir que el sistema de riego artificial tuvo un efecto positivo sobre la recuperación de la cobertura vegetal que, según los resultados mencionados en el plan, se acercarían de una situación de naturalidad (en comparación con otros bofedales con características similares).

Sin embargo, también se identificó un conjunto de debilidades asociadas al diseño del plan de manejo hasta la fecha. En primer lugar, se recalca una falta de claridad, de integración, análisis, interpretación y accesibilidad de la información sobre el bofedal, muchas veces esta existe, pero su fragmentación y la no coordinación de los equipos de monitoreo y línea base no permiten su adecuada utilización y generan retrasos y complicaciones en su uso e interpretación. Además, esta información fue juzgada como descriptiva y clasificatoria, culminando en dificultades para identificar vínculos entre los elementos del ecosistema o entre variables bióticas y abióticas, dificultando la adopción de un punto de vista sistémico o funcional. Existe además una falta de bases científicas y bibliográficas para poder consolidar las actividades de restauración con experiencias internacionales y respaldarlas con bases sólidas.

La falta de un ecosistema de referencia o ecosistema objetivo no permite generar suficiente claridad sobre el estado objetivo al que se quiere acercar con las acciones y las comparaciones del bofedal con otros sitios no siempre toman en cuenta todos los componentes clave de biodiversidad y paisaje a conservar o restaurar.

Otra debilidad de la estrategia reside en la falta de robustez de ciertos métodos y metodologías, entre otros, la falta de validación de ciertos modelos (modelos numéricos) con análisis de sensibilidad de datos, la escala del método de

estimación de evapotranspiración, la ausencia de toma en cuenta de ciertas variables como el cambio climático o la disponibilidad de métodos más fiables para ciertas medidas, como el desempeño fisiológico de la vegetación.

En síntesis, se identificó una falta de enfoque funcional, ya que no se consideran lo suficiente los flujos del ecosistema y las interacciones entre sus componentes bióticos y abióticos, que permitan explicar tendencias pasadas, anticipar tendencias futuras e interpretar fenómenos presentes relevantes para la provisión de servicios y funciones ecosistémicas. El objetivo es ser efectivos en generar una compensación equivalente, no solamente de componentes aislados, sino que de funciones ecosistémicas resilientes.

Recomendaciones

En base a la identificación de las principales fortalezas y límites de la estrategia y medidas de compensación de Lagunillas, la auditoría formula recomendaciones y sugerencias para resolver las falencias identificadas.

Las recomendaciones formuladas se ubican dentro de tres marcos generales: la necesidad de una mirada funcional, de la integración de la información, y de la sistematización y mejora de la robustez de ciertas metodologías y herramientas de modelización, control y toma de decisión. Estos marcos son permeables, es decir que la mayoría de las acciones recomendadas movilizan más de un marco. Las principales recomendaciones están resumidas en la Figura 2.

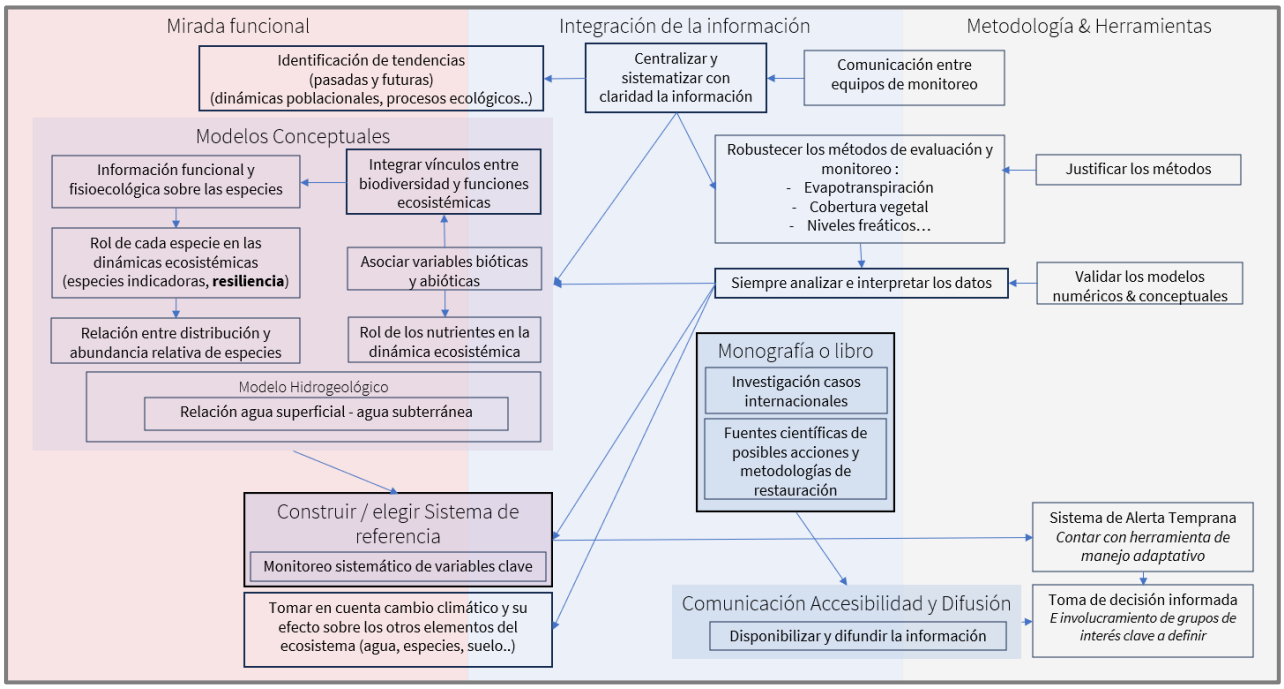

Figura 2. Resumen de las principales recomendaciones generadas en la primera auditoría de la recuperación de Lagunillas[12]. La figura destaca las principales acciones recomendadas, ordenadas en 3 marcos principales, agrupadas por tema y señala los vínculos entre ellas, cada flecha indicando qué acción alimenta a otra u otro grupo de acciones. Las líneas gruesas indican las recomendaciones prioritarias.

La sección 8.1 del Anexo 1 detalla los principales avances y las principales conclusiones generadas gracias a las dos auditorías.

5 UNA RUTA HACIA LA COMPENSACIÓN DEL BOFEDAL DE LAGUNILLAS.

Esta ruta tiene 5 etapas principales:

(1) definir la situación actual,
(2) definir un ecosistema de referencia,
(3) actualizar el impacto residual,
(4) construir las alternativas de compensación y,
(5) seleccionarlas e implementarlas.

Un resumen de las principales actividades de cada etapa se muestra en la Figura 3.

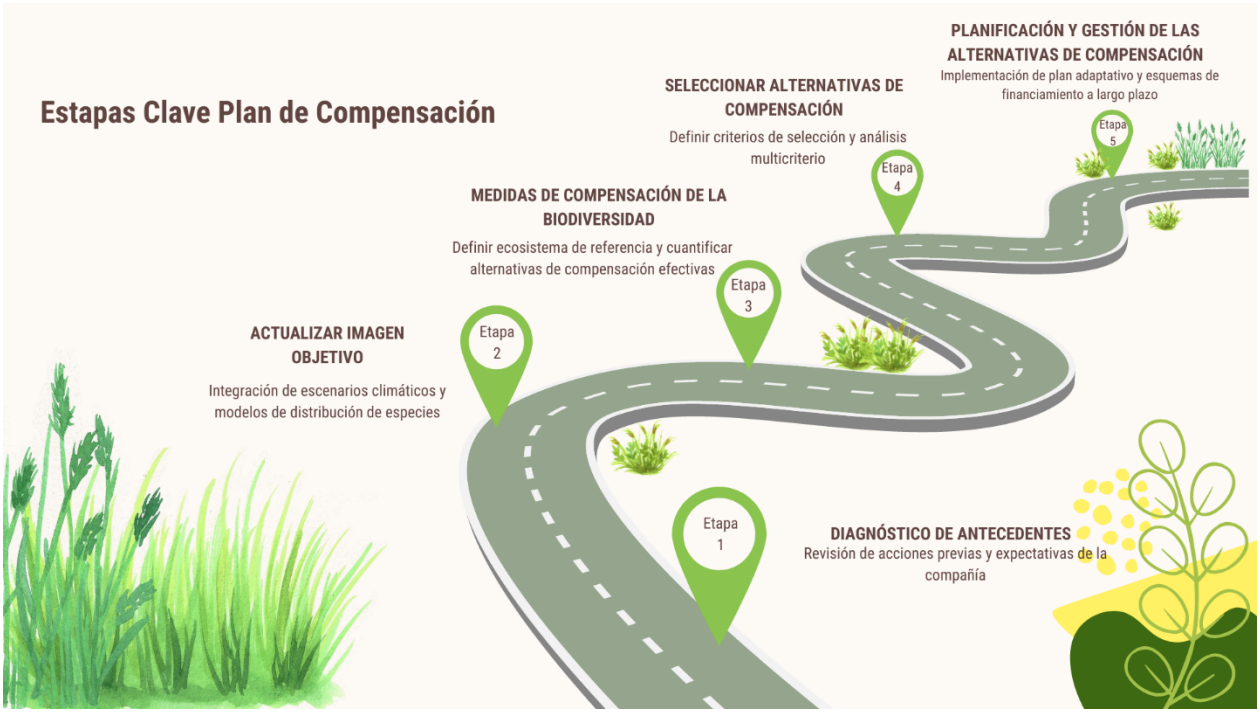

Figura 3: Una ruta hacia la compensación equivalente del impacto sobre la biodiversidad del bofedal de Lagunillas.

Es importante destacar que, a diferencia de las alternativas de compensación trabajadas hasta la fecha, en este informe se incorpora trabajo permanente con stakeholders, quienes deben validar e involucrarse en las acciones de manejo desde etapas tempranas. Por otra parte, las acciones propuestas vienen a complementar el trabajo desarrollado a la fecha, para que este proceso se adapte a los requerimientos legales y corporativos, además de hacer más eficiente la gestión y manejo del proyecto.

A continuación, se presentan en mayor detalle las distintas etapas y actividades propuestas para el desarrollo de esta ruta de compensación equivalente.

5.1 ETAPA 1: DIAGNÓSTICO DE ANTECEDENTES Y EXPECTATIVAS DE LA RUTA

Durante esta etapa, clave para la formulación del plan, se revisó toda la información primaria y secundaria disponible sobre la ecología del bofedal de lagunillas, la historia del conflicto socio-ambiental y las acciones implementadas a la fecha por CMCC y BHP.

También se levantó la visión y expectativas de la compañía a través de un taller de trabajo sobre esta ruta de compensación. Además, se analizaron las alternativas de tenencia de la tierra con la unidad de Land Management.

Esta información se utilizó para proponer un plan que cumpla con estas expectativas, y que incorpore el trabajo realizado hasta la fecha.

5.1.1 Revisión y sistematización de antecedentes de la afectación del bofedal de Lagunillas

Se revisaron todos los documentos e información levantada por la compañía y aquella disponible en fuentes de información pública sobre Lagunillas. Esto fue sistematizado y ordenado en un anexo digital[22], separados por temáticas que faciliten el acceso a esta información, almacenada en una carpeta digital.

En general, se concluye que existe suficiente información para implementar un plan de compensación equivalente de la biodiversidad y sus atributos. Además, BHP cuenta con varios instrumentos de gestión del lugar[23]. De esta manera, esta ruta no comienza desde cero, sino que continúa el trabajo avanzado hasta la fecha.

5.1.2 Identificación de expectativas de la compañía respecto al plan de compensación

La visión sobre la implementación del plan de compensación se levantó a través de un taller de expectativas el día 15 de junio de 2023, donde participó el equipo consultor, representantes de las áreas de Medio Ambiente Regional de BHP, Asuntos Corporativos, equipo de Cierre y Medio Ambiente Ejecución de Pampa Norte.

En términos generales, se validó la propuesta de trabajo, se aclararon dudas y se recogió retroalimentación para la formulación e implementación del proyecto, para incorporarlas en la etapa de diseño[24].

En resumen, se destaca que la compensación equivalente sería deseable, para habilitar el camino para futuros permisos y autorizaciones ambientales de CMCC.

Al mismo tiempo, se observan dos posiciones dentro de CMCC; una plantea que la restauración exitosa del bofedal haría innecesaria la compensación, y la otra posición asume que la restauración exitosa del bofedal (a futuro) no excluiría a la compañía de compensar la afectación de los ecosistemas, sobre todo considerando las metas públicas de BHP relacionadas con el plan *Nature Positive*.

Esta situación origina otra expectativa sobre este plan; una ruta de compensación de Lagunillas debe ser justificada con fundamentos científico-técnicos, legales y económicos, y en base a esto construir un caso de negocio robusto para la presentación del plan a los equipos de liderazgo de la compañía.

[22] Disponibles en el sharepoint del proyecto
[23] Entre ellos, plan de conservación, plan de alerta temprana, plan ecosistémico.
[24] La minuta del taller se adjunta como anexo en la sección 6.1

5.2 ETAPA 2: ACTUALIZACIÓN DE LA IMAGEN OBJETIVO

La imagen objetivo del bofedal de Lagunillas fue definida en el Plan de Manejo del bofedal (2008) y oficializada mediante la Resolución Exenta N°67/2011.

Se desarrolló con base en un conjunto de parámetros ecológicos teóricos, que se usarían como indicadores de éxito de la recuperación del bofedal, tras la ejecución de su plan de restauración. Estos parámetros se estimaron durante el levantamiento de la línea de base del "Proyecto de Continuidad Operacional (EIA 2009)", utilizando imágenes aéreas históricas de la laguna Huantija y la superficie real de cojines vegetacionales, medidos en el sistema azonal en base a los restos ("rastrojos") registrados tras la desaparición de flujos naturales por los impactos del proyecto.

Desde entonces, la imagen objetivo del bofedal ha sido actualizada en las Resoluciones de Calificación Ambiental N°69/2015 y N°13/2022, de acuerdo con la evolución de las variables relevantes objeto de seguimiento del Plan de Manejo, y se define de acuerdo a las siguientes características:

Cuerpo de agua:

- **Superficie de laguna**: ≥ 0,5 ha

Bofedal:

- **Superficie de bofedal puro**: ≥ 8,3 ha (7,13 ha de vegetación azonal **dominada por cojines** de las especies *Oxychloe andina* y *Zameioscirpus atacamensis* y 1,17 ha de cursos de agua, suelo desnudo y otras especies acompañantes)
- Aporte relativo **de cojines a cobertura vegetacional**: 70% - 90%
- **Cobertura de especies propias de bofedal**: ≥ 78% de la superficie cubierta por vegetación azonal (valor incorporado en RCA N°69/2015)
- **Cobertura de rastrojo y/o mantillo**: ≤ 5% (valor incorporado en RCA N°13/2022)

En el marco de la gestión del bofedal de Lagunillas, se comenzó a implementar el uso de 'formaciones testigo' o bofedales control para el seguimiento de variables relevantes del ecosistema, con el fin de minimizar los riesgos de un manejo que se aleje de las variaciones ambientales naturales del sistema, derivadas de la variabilidad climática.

En línea con esta iniciativa, el reciente Acuerdo de Transacción entre el titular del proyecto y las partes interesadas, aprobado en noviembre de 2023[11], ha acordado una serie de medidas complementarias a las resoluciones ambientales vigentes, con el fin de favorecer la recuperación del acuífero del bofedal. Una de ellas es la actualización de la Imagen Objetivo del Plan de Manejo de Lagunillas, que debe plantearse tomando en consideración la evolución natural de los bofedales altoandinos de la cuenca Lagunillas, incluyendo los efectos del cambio climático.

Para llevar a cabo esta actualización de manera rigurosa, se propone en primer lugar la selección de uno o más bofedales control[25], que servirán como testigo de la condición futura de un bofedal de esa región *sin* impactos ambientales significativos, pero considerando nuevas condiciones ecológicas y climáticas.

[25] Un "bofedal control" no es sinónimo o equivalente a un "bofedal de referencia". El bofedal control es un ecosistema real similar a Lagunillas, mientras que un bofedal de referencia es un modelo teórico, basado en datos empíricos, de cómo sería Lagunillas si nunca hubiera sido afectado por las operaciones de CMCC.

5.2.1 Cambios en Distribución de Especies clave frente a escenarios de Cambio Climático

La imagen objetivo de Lagunillas se reestablecerá tomando en consideración el nicho ecológico ocupado por las especies clave del bofedal (dominantes formadoras de cojines, amenazadas y/o endémicas), y los cambios en sus rangos geográficos de distribución, que se generen como respuesta a variaciones climáticas de proyecciones futuras de cambio climático. El objetivo de realizar este análisis es para introducir rangos en las distintas variables relevantes de la imagen objetivo, considerando el comportamiento histórico del bofedal y proyecciones de su futuro comportamiento bajo distintos escenarios de cambio climático. Para conseguir esto se proponen las siguientes acciones, descritas en la Tabla XXX;

Tabla 2: Acciones de actualización de la imagen objetivo para la incorporación de escenarios de cambio climático.

Acciones	**Detalle**
Recolección de datos georreferenciados	Registros de presencia de especies objetivo desde bases de datos disponibles (e.g. especies dominantes de bofedal *Oxychloe andina* y *Zameioscirpus atacamensis*). Fuentes: GBIF, líneas de base, planes de seguimiento, etc.
	Rasters de variables ambientales (temperatura, precipitación, humedad, tipo de suelo). Fuentes: Líneas de base, WorldClim, Copernicus, etc.
	Escenarios de proyecciones climáticas ante diversos escenarios (RCP 2.6, 4.5, 8.5), obtenidos del Estudio de Cambio Climático llevado a cabo en el área de estudio de la presente propuesta (Golder, 2021[26]).
Construcción del Modelo de Nicho Ecológico (ENM)	Compilación y procesamiento de datos sobre presencia de especies y co-variables ambientales asociadas a las localidades respectivas, que se sepa que influyen en la ocupación de hábitats de la especie a modelar.
	Selección y ajuste del mejor modelo/algoritmo (en función de cambios en algoritmos de modelación, parámetros de regularización, funciones de características, y otros)
	Análisis de sensibilidad (análisis de las variaciones en la distribución modelada según diferentes valores utilizados en parámetros claves del ENM)

[26] Golder (2021) Informe Estudio de Cambio Climático. BHP - Pampa Norte: Cierre de las Instalaciones de Cerro Colorado.

	Cartografías temáticas con los resultados.
Proyección de nicho en Espacio Geográfico	Distribución geográfica actual probable en función del modelo de nicho de la especie
	Proyección geográfica futura bajo modelos climáticos (RCP 2.6, 4.5, 8.5)
Análisis de resiliencia climática del ecosistema	Identificación de las variables más sensibles (e.g. precipitación, temperatura, evaporación, etc) que podrían comprometer la estabilidad del ecosistema
	Identificación de áreas de resiliencia o refugios climáticos, donde las condiciones ambientales actuales y futuras sean favorables para la especie

Fuente: Cienciambiental, 2025

Algunos resultados esperados de estos análisis son Mapas de distribución geográfica de las especies claves del bofedal, indicando los lugares de mayor idoneidad en función de las condiciones ambientales actuales, como también futuras, bajo varios (2-3) escenarios de cambio climático. También se podrán producir curvas de respuesta de las distintas especies ante variables ambientales como la temperatura o la precipitación, y mapas de refugios climáticos de comunidades o frente a estrategias de migración climática asistida.

Finalmente, para cumplir con los objetivos de este análisis, se deberán incorporar ciertos rangos de cumplimiento en los indicadores ecológicos de recuperación del bofedal, para permitir una adaptación de la imagen objetivo a condiciones de cambio en variables críticas de sistemas dinámicos, naturalmente variables. Se evaluará en base a información histórica y a los resultados de las proyecciones de nicho ecológico sobre espacio geográfico, en función de varias proyecciones climáticas. Se espera generar nuevos rangos de cobertura esperada por especie, frente a los valores fijos existentes actualmente, para reflejar posibles variaciones futuras en cobertura producto de proyecciones climáticas contrastantes.

5.3 SELECCIÓN DE BOFEDAL CONTROL

Para aislar el potencial efecto del cambio climático sobre el bofedal de Lagunillas mientras el SRA se encuentre en ejecución, se siguió el procedimiento metodológico implementado por el CEA (2024)[27] para la búsqueda y selección de bofedales control. Se analizaron 13 bofedales como candidatos a ser "control", incluyendo subsecciones (ej: Collacagua 1, 2 y 3). Los bofedales analizados se muestran en la Tabla 3

Tabla 3: Bofedales analizados para la selección de un bofedal control de Lagunillas.

Nombre	Cuenca	Accesibilidad (dificultad)	Formación Vegetacional	Riqueza Vegetación	Especie dominante	Cobertura promedio especie dominante	Costra salina*	Presencia fauna íctica **
Lagunilla	Lagunilla	Baja	Bofedal	13	*Oxychloe andina*	61,61	Si	Si
Collacagua 3	Collacagua	Baja	Bofedal	4	*Oxychloe andina*	69,30	Si	Si
Lirima Chauhin	Lirima	Baja	Bofedal	5	*Oxychloe andina*	67,82	Si	Si
Salasalani	Lagunillas	Baja	Bofedal	3	*Oxychloe andina*	63,07	No	Si
Guantija	Lagunillas	Baja	Bofedal	6	*Oxychloe andina*	48,26	Si	Si
Jornuni Falla Lirima	Lirima	Baja	Bofedal	6	*Oxychloe andina*	32,01	Si	Si
Huella Rinconada	Lagunillas	Baja	Bofedal	7	*Oxychloe andina*	78,44	Si	No
Llacho	Lagunillas	Baja	Bofedal	7	*Oxychloe andina*	17,25	Si	Si
Queñoa	Collacagua	Baja	Bofedal	5	*Oxychloe andina*	35,25	Si	No
Collacagua 1	Collacagua	Baja	Bofedal	4	*Oxychloe andina*	36,35	No	No
Collacagua 2	Collacagua	Baja	Pajonal	4	*Cinnagrostis velutina*	31,34	No	No
Coniri	Lagunillas	Media	Pajonal	N/E	Festuca sp.	N/E	N/E	No
Guallacagua	Lagunillas	Alta	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E	N/E

* El valor umbral utilizado para identificar si un bofedal es salino es aquel que presenta afloramiento salino mayor a 5%, el cual es evaluado en los meses de menor déficit hídrico (Ahumada y Faúndez, 2009). **Refiere a la presencia de *Orestias agassi* N/E: No evaluado. Fuente: CEA, 2024. En color verde los bofedales seleccionados como posibles bofedales control y en color blanco los bofedales desestimados como bofedal control. Fuente: CEA, 2024.

Para este análisis comparativo -el objetivo era buscar un bofedal lo más parecido posible a Lagunillas- se utilizaron variables meteorológicas, físicas, bióticas (fauna íctica y vegetación) y un análisis histórico de la dinámica vegetacional de cada bofedal. Los resultados del estudio mencionado hacen referencias a dos selecciones de bofedal.

[27] Centro de Ecología Aplicada (2024) Informe Selección de bofedal de control para evaluar su comportamiento natural en comparación con el Bofedal Lagunillas – Compañía Minera Cerro Colorado

5.3.1 Primera selección de bofedal control

En una primera selección de bofedales control, se seleccionaron 6 candidatos. Esta primera selección considera como criterio la cobertura de *Oxychloe* (entre 70% y 90%), la presencia de fauna íctica nativa (*Orestias*) y la accesibilidad. Los resultados de esta selección se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Primera selección de humedales control para Lagunillas.

Nombre	Cuenca
Collacagua 3	Collacagua
Lirima Chauhin	Lirima
Salasalani	Lagunillas
Guantija	Lagunillas
Jornuni Falla Lirima	Lirima
Huella Rinconada	Lagunillas

Fuente: CEA, 2024

5.3.2 Segunda selección de bofedal control

Luego se hizo un análisis más complejo (multicriterio) para considerar diferentes aspectos de cada bofedal, y se utilizaron herramientas de sistemas de apoyo a la toma de decisiones para evaluar cada alternativa cuantitativamente.

En cada comparativa se consideraron cuatro criterios de selección, cada uno compuestos por distintas variables medidas en cada bofedal. Los criterios utilizados fueron; **composición**, **estructural**, "**amenazas & presiones" y "gestión, uso & conservación".**

Luego se realizaron dos tipos de análisis, uno de similitud y otro de "Análisis de Jerarquía de Procesos" (AHP), una metodología de apoyo a la toma de decisiones complejas.

Este último es un método de decisión multicriterio que ayuda a seleccionar entre distintas alternativas en función de una serie de criterios o variables de selección, normalmente jerarquizadas, y que suelen entrar en conflicto entre sí.

En el primer análisis, de similitud, se hicieron dos comparaciones. Primero sólo se comparó la composición florística de los distintos bofedales pre-seleccionados, y la segunda se realizó considerando todos los criterios y estimando una distancia numérica ("euclidiana") entre ellos, determinando aquellos más similares a Lagunillas.

El segundo análisis de jerarquía de procesos se estructuró considerando todos los criterios antes mencionados. Para ver el detalle de cada análisis y los criterios utilizados, además de las variables que considera cada uno, referirse al estudio CEA (2024).

Los bofedales control seleccionados según estos dos métodos fueron los que muestra la Tabla 5.

Tabla 5: Bofedales seleccionados para ser control del bofedal de Lagunillas.

Orden Jerarquico	Similitud	AHP
1	Huella Rinconada	Huella Rinconada
2	Jornuni-Falla lirima	Salasalani
3	Guantija	Guantija
4	Lirima Chahuin	Jornuni-Falla Lirima
5	Salasalani	Lirima Chahuin
6	Collacagua 3	Collacagua 3

Los resultados muestran que el mejor candidato para ser bofedal control es el de **Huella Rinconada**. Sin embargo, ese bofedal no mostró la presencia de *Orestias*, requisito fundamental de la imagen objetivo. En cualquier caso, esta ausencia puede deberse al muestreo realizado, que tuvo sólo una campaña, (Julio 2024). Si se confirma la presencia de *Orestias* en el bofedal, parece ser el mejor candidato para bofedal control.

En caso de no encontrarse *Orestias*, se podrían utilizar dos bofedales como bofedales control. Huella Rinconada sería el más similar en todos los aspectos analizados a Lagunillas, pero se debería monitorear otro bofedal adicional para analizar la respuesta de *Orestias* específicamente. Los bofedales de Guantija o Salasani parecen buenos candidatos para ello, ya que cuentan con presencia de fauna íctica nativa, sumado a que se encuentran en la misma cuenca de Lagunillas.

5.4 MEDIDAS DE COMPENSACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD

La legislación chilena indica que una "compensación de biodiversidad apropiada" requiere una cuantificación de las pérdidas y ganancias de biodiversidad (SEA, 2022_a)[4]. Esta información es fundamental para cuantificar el impacto residual luego de la aplicación de medidas de mitigación y restauración, y así poder asegurar, mediante evidencia directa y cuantitativa, que luego de finalizada la restauración, el resultado sea "positivo para la naturaleza".

La mencionada guía, haciendo referencia al art. 100 del reglamento del SEIA, indica que las medidas de compensación apropiadas deben generar un **efecto positivo alternativo y equivalente** (pérdida neta cero) **o superior** (ganancia neta) al del impacto residual, y mantenerse a largo plazo **considerando la duración de los impactos**. Además, indica que la compensación de los recursos o elementos del medio ambiente afectados se debe hacer por otros de similares características, en cuanto a los atributos de la biodiversidad: composición, estructura y función. Estas características son parte de los **requisitos de equivalencia** establecidos por la autoridad, e implican establecer un ecosistema o sitio de referencia[28] para realizar este balance.

Sin embargo, muchas veces no se cuenta con toda la información necesaria para realizar esta cuantificación directamente, frente a lo cual se debe recurrir a metodologías complementarias, con validez científica, para poder responder apropiadamente a las metas de la compañía y proponer medidas de compensación acordes al impacto residual estimado.

Teniendo esto en cuenta, y siguiendo las recomendaciones de SEA (2023), se proponen los lineamientos metodológicos para definir estos dos aspectos clave para establecer las metas del plan compensación:

1) **Identificación de atributos de biodiversidad y Determinación del Ecosistema de Referencia** que deben ser foco de restauración y/o conservación en el área de compensación. Esta propuesta metodológica facilitará la identificación de ecosistemas equivalentes y asegurará que la compensación ocurra dentro del mismo tipo de ecosistema impactado.

2) **Cuantificación del impacto ambiental residual** de la extracción de agua de CMCC sobre el bofedal Lagunillas, complementando los cálculos realizados hasta la fecha. Este impacto residual es la diferencia de las características ambientales en el bofedal de Lagunillas (Ecosistema Impactado) entre su estado inicial (sin proyecto de CMCC), hasta antes del inicio del programa de restauración de Lagunillas y también tras el cierre del proyecto de CMCC en diciembre de 2023, considerando los esfuerzos de restauración realizados hasta fecha.

[28] La guía metodológica para la compensación de biodiversidad en el SEIA (SEA 2023), indica qué sitio de referencia debe considerarse como aquel que contiene la formación de mayor complejidad estructural esperable para dicho ecosistema, de acuerdo a los antecedentes bibliográficos y juicios de expertos.

5.4.1 Identificación de variables de Biodiversidad y Definición del Ecosistema de Referencia

Se propone un procedimiento de dos pasos para definir los ecosistemas de referencia. Considerando las brechas de información en el caso de lagunillas[29], en cada paso se proponen metodologías complementarias que permitan subsanar estas brechas y cumplir con los objetivos de la ruta de compensación. Los tres pasos mencionados son los siguientes:

5.4.1.1 *Revisión de parámetros de biodiversidad*

Los parámetros de biodiversidad resultantes de las modelaciones de la Etapa 2 de la Ruta, cuyos atributos de composición, estructura y funciones ecosistémicas definirán la Imagen Objetivo actualizada, en la que se asume el efecto del cambio climático.

Dicha imagen se emplearía además para seleccionar bofedales control de características mayormente equivalentes a las del bofedal de Lagunillas, en su condición sin impacto.

Una vez que el bofedal de Lagunillas alcance el estado de equilibrio natural[30] posterior a la fase de mantención del Plan de Manejo (ver RCA N°13/2022), sus atributos definirán la Imagen Objetivo del bofedal. Se debe incluir un análisis de brechas de información sobre biodiversidad para calcular el impacto residual, de manera de poder seleccionar las metodologías complementarias que acorten estas brechas.

5.4.1.2 *Determinar el ecosistema de referencia para Lagunillas.*

El ecosistema de referencia es un ejemplo representativo, de alta calidad y sin intervenciones. Se usarán los antecedentes e información levantada en el paso 1 como insumos para proceder con una caracterización de los atributos del bofedal Lagunillas.

Estos valores se obtienen a partir de las estimaciones teóricas de coberturas absoluta y relativa de la vegetación, composición de especies y superficie lagunar obtenidas en la elaboración del Plan de Manejo de Lagunillas (Resolución Exenta N°67/2011), actualizados en los posteriores RCA, y ahora reemplazados con la integración de modelos climáticos y de nicho de especies para evaluar la evolución natural del ecosistema dado el efecto potencial del cambio climático.

Entonces, teniendo en cuenta los antecedentes del paso 1, se deben levantar los componentes y atributos de ecosistemas “típicos” de la misma zona ecológica -y equivalentes al de Lagunillas en cuanto a su biodiversidad- para construir este “ecosistema de referencia”. Este define los atributos de la biodiversidad en sus distintos niveles de organización que deben ser compensados, considerando su importancia ecológica, los servicios ecosistémicos que proveen y las singularidades ambientales que deben ser consideradas para la compensación (especies/poblaciones,

[29] Relacionadas con la antigüedad de la operación de CMCC en el lugar

[30] Definido como la condición de cumplimiento de la imagen objetivo del bofedal de Lagunillas, en cuanto ésta refleja lo que se estableció como imagen del bofedal antes de ser afectado, que por lo tanto se corresponde con la imagen del bofedal que el sistema podrá sostener al término del Plan de Manejo (Anexo 1.5.1, Adenda 3, EIA Proyecto Continuidad Operacional Cerro Colorado, 2015)

comunidades, ecosistemas). Este ecosistema de referencia debe entenderse como un “plano” o “esquema” del ecosistema que se busca restaurar, que a la vez sirve de guía para la búsqueda de sitios para compensación.

5.4.2 Cuantificación del impacto residual y Ganancia en Biodiversidad

Usando como referencia los lineamientos de la Guía Metodológica para la Compensación de Biodiversidad en Ecosistemas Terrestres y Acuáticos Continentales del SEIA. Acá se deben determinar escenarios para distintos rangos de tiempo, que permitan dividir la línea de tiempo de Lagunillas en fases donde se pueda estimar el impacto residual del proyecto. Se sugiere que estos escenarios deben incluir: (1) la situación previa al proyecto minero, (2) cuando aún no se implementaba ninguna iniciativa de restauración, y (3) otro con restauración.

En la Tabla 6 se sintetizan las técnicas propuestas para cumplir con cada paso del cálculo del impacto residual. El detalle metodológico se entrega en los anexos de este documento.

Tabla 6. Detalle de las metodologías propuestas para abordar cada uno de los pasos y vinculo a anexo metodológico detallado

Paso	Objetivo	Brechas	Metodología propuesta	Detalle metodológico
Paso 1	Identificar las variables de la Imagen Objetivo actualizada (Etapa 2)	Falta de información certera de la Imagen Objetivo de Lagunillas (condición sin Proyecto)	- Revisión de resultados de actualización de Imagen Objetivo (Etapa 2) - Levantamiento de datos ecológicos de Bofedales control cuyos atributos representen las condiciones ecosistémicas del bofedal de Lagunillas sin intervención y considerando variaciones climáticas - Revisión y análisis de imágenes satelitales	Anexo 6.1
Paso 2	Determinar un ecosistema de referencia (condición inicial), y caracterizar atributos de biodiversidad a compensar.	Existen dificultades metodológicas para identificar un ecosistema que actualmente represente el ecosistema afectado, especialmente si se cuenta solo con datos de biodiversidad y cobertura teóricos.	Se propone una metodología de análisis multicriterio para identificar ecosistema/s de referencia del área afectada, considerando información geográfica y climática (de libre disposición), además de la información levantada en el Paso 1. Permite dar robustez a la estimación de equivalencias, sobre todo cuando no hay información de suficiente detalle sobre biodiversidad en los inicios de la intervención del bofedal. Además, ayuda a caracterizar los atributos a compensar.	Anexo 6.2
Paso 3	Calcular impacto residual, ganancia en biodiversidad, y ganancia neta en biodiversidad	Hace falta definir la estrategia que utilizará la compañía para obtener una ganancia neta.	Se sugiere utilizar metodología SEA (2023) resumida en el Anexo	Anexo 6.3

Al finalizar esta etapa estará definido el ecosistema de referencia para el bofedal de Lagunillas, caracterizando las variables que lo definen cuantitativamente. Además, comparando este ecosistema de referencia con el estado actual e histórico del bofedal, se podrá actualizar y complementar el cálculo del impacto residual, es decir, el impacto total del proyecto sobre la biodiversidad, en términos cuantitativos. Los resultados deberían incluir el área y los atributos afectados. En los anexos metodológicos (Anexo 3, sección 10) se entregan más de 30 atributos para caracterizar ecosistemas.

El ecosistema de referencia servirá como insumo básico de la siguiente etapa, que deberá buscar otras zonas del territorio donde existan ecosistemas como el de referencia, pero en las mejores condiciones posibles. Luego, teniendo en cuenta el impacto residual, o la deuda de biodiversidad, se deben seleccionar el o los sitios que permiten saldar esa deuda y conseguir un saldo positivo para la naturaleza.

En ejercicios anteriores de cálculo de compensación realizados por la compañía para el bofedal de Lagunillas, se necesitaban una combinación de entre dos y cuatro ecosistemas distintos para conseguir una compensación equivalente. Estos eran ecosistemas presentes en las localidades de Isluga, Aroma, Penjamo y la hacienda Cancosa.

5.4.3 Identificación de áreas potenciales para la compensación equivalente

En esta etapa se deberá realizar una búsqueda a gran escala -utilizando herramientas de detección remota- para identificar aquellos lugares donde se puede compensar efectivamente el área y los atributos afectados del bofedal de Lagunillas, los que serán equivalente a una o varias veces el impacto residual, según la Relevancia de los ecosistemas afectados. Se identificarán zonas tentativas de compensación usando el Mapa de Relevancia de la Guía Metodológica SEA (2023).

Considerando que los atributos de biodiversidad responden a las condiciones del ecosistema que habitan y su entorno, y que los bofedales tienen una expresión en parches de baja extensión, se propone que la compensación equivalente del impacto residual se realice desde una perspectiva de paisaje, que considera un espacio compuesto por más de un ecosistema (SEA 2023).

La normativa chilena vigente exige que la compensación debe realizarse cumpliendo criterios de equivalencia y conectividad. Para abordar la equivalencia y conectividad, se presentan metodologías para evaluarla en todos los niveles de biodiversidad: i) ecosistemas y paisajes, ii) especies/poblaciones y comunidades, iii) genes.

Estos métodos, en su mayoría basados en las recomendaciones de la autoridad ambiental, no solo permiten caracterizar conectividad y equivalencia, sino también suman como criterios para evaluar la mejor opción de compensación (ver Anexos metodológicos).

Este enfoque permite tener una visión más integral de la evolución de hábitat y las poblaciones, permitiendo considerar la dinámica futura de los ecosistemas, que siempre varia por factores forzantes de gran escala, en particular aquellos derivados del cambio climático, sobre todo en un contexto de emergencia climática.

Para incorporar una mirada a largo plazo que considere estos aspectos dinámicos de los ecosistemas, y asegure que la compensación se sostenga a largo plazo, de acuerdo con los requisitos de la autoridad, se presenta la metodología de evaluación de riesgos ecosistémico propuesta por la UICN, que permite evaluar la relevancia de los sitios de compensación en cuanto a la vulnerabilidad de los ecosistemas de ser afectados por otras amenazas que podrían poner en riesgo sus sostenibilidad futura, a pesar de tomar medidas de compensación.

Este amplio espectro de opciones metodológicas apunta a que las alternativas de compensación puedan estar definidas con métricas de alto estándar científico y técnico, que permita cuantificar y evaluar los resultados de las medidas de compensación. Esto busca asegurar la credibilidad de las acciones de la compañía para alcanzar una operación positiva para la naturaleza.

5.5 CRITERIOS PARA CONSTRUIR Y SELECCIONAR LAS ALTERNATIVAS DE COMPENSACIÓN

En esta etapa se deberá generar un listado de criterios para el análisis de viabilidad de las distintas alternativas de compensación levantadas en las etapas anteriores, con un diseño de análisis multicriterio para seleccionar la mejor alternativa, indicando criterios a considerar, pesos a asignar y variables del análisis a ser consideradas.

El uso de esta herramienta de análisis, si bien no es requerida como parte de la metodología del SEA, permite encontrar la opción más eficiente en costo-beneficio y apoyar la toma de decisiones para la implementación de un plan de compensación exitoso, alcanzando el objetivo de biodiversidad deseado. Este enfoque además permite insertar esta ruta de manera más compatible con el *BHP Operating System* (BOS), que utiliza el análisis multicriterio para la evaluación y desarrollo de proyectos.

5.5.1 Planificación sistemática de la conservación: análisis multicriterio

La Planificación Sistemática de la Conservación (PSC) ofrece un enfoque robusto y ampliamente usado para evaluar opciones de compromisos de conservación[31]. Este enfoque se basa en el establecimiento transparente de metas y objetivos, indicadores de biodiversidad y servicios ecosistémicos, así como factores de penalización -como el costo de adquisición de tierras- con el fin de optimizar la selección de una red de áreas que cumplan con la compensación equivalente del bofedal de Lagunillas. La mayoría de los planes sistemáticos de conservación tienen en cuenta tres principios clave: exhaustividad, adecuación y representatividad[32]:

Exhaustividad (Comprehensiveness): Esto se refiere a la inclusión de todos los componentes relevantes de la biodiversidad dentro del área de estudio en el plan. Incluye una variedad de elementos, desde especies hasta ecosistemas. El objetivo es garantizar que todos los aspectos importantes de la biodiversidad se tengan en cuenta.

Adecuación (Adequacy): Este criterio evalúa si los sitios son lo suficientemente grandes, o si tienen la capacidad de resistir amenazas o perturbaciones (como el cambio climático, la deforestación, la invasión de especies exóticas, entre otros), para garantizar la sobrevivencia de su biodiversidad a largo plazo.

Representatividad (Representativeness): Este principio se asegura de que las áreas protegidas cubran el rango completo de variación de las especies, tipos de hábitat y ecosistemas de interés.

En el plan "Ruta para la compensación equivalente de la biodiversidad del bofedal Lagunillas y sus atributos", el tipo de ecosistema "bofedal altoandino", las especies que los componen y los servicios ecosistémicos que proveen son identificados como objetos de conservación. Complementariamente, se deberán incluir otras áreas que cumplan con criterios de alto valor en biodiversidad (IBEs) y que sean parte del área de influencia del activo.

Por ejemplo, aquellos que corresponden a ecosistemas de "Oasis de Neblina" del farellón costero de las regiones de Tarapacá y de Antofagasta o incluso otros sistemas vegetacionales altoandinos (ej: vegas y vertientes) que sean parte del área de influencia del activo. Esto permite ampliar el rango de opciones de conservación y aumentar la probabilidad de conseguir un impacto neto positivo. Además, cualquier iniciativa de conservación debe colaborar con la meta 2030 de tener un 30% del área bajo tutela de BHP con proyectos de conservación, restauración o

[31] Ball *et al*., 2009
[32] Kukkala y Moilanen, 2013

regeneración, y prepararse para reportar los resultados a las cuentas ambientales de capital natural en el futuro próximo.

Adicionalmente, la PSC es iterativa, al involucrar un diálogo continuo con las partes interesadas ("stakeholders": empresas, comunidades locales, gobiernos, ONGs y científicos), para co-definir los objetivos de conservación y las estrategias para alcanzarlos, siendo esta una de las razones de porqué es necesario contar con una identificación y mapeo de actores (Anexo 6.5). Este involucramiento continuo es compatible con las políticas de pueblos originarios y las metas de valor social de la compañía.

La aproximación propuesta se basa en el diseño de una red de áreas relevantes para la conservación que considere los "ecosystem boundary maps" (EBM) de cada activo, de acuerdo con su plan de naturaleza positiva. Los EBM incorporarán los bofedales identificados como sitios de compensación equivalente (bofedales equivalentes), así como otros IBEs. Estas áreas se incluirán en las alternativas de compensación: ya sea enfocándose exclusivamente en bofedales equivalentes, o en un enfoque combinado que incluya tanto bofedales como otros IBEs identificados dentro de los límites del EBM. Además, algunos otros factores como la presión humana y las amenazas a estos ecosistemas (por ejemplo, el cambio climático, la extracción de agua, otras operaciones mineras, etc.) deben ser considerados para descartar áreas en los EBM. Para que puedan cumplir su rol de conservación de la biodiversidad las áreas no pueden ser ecosistemas altamente degradados.

En esta etapa se busca construir las distintas alternativas de compensación, que estarán compuestas por diferentes proyectos de conservación, que sumados entregarán una compensación total equivalente de los impactos sobre bofedal de Lagunillas. Además, entrega las herramientas para que los equipos de liderazgo de CMCC puedan decidir si quieren aportar con áreas adicionales de conservación y así aportar hacia las metas globales de BHP.

5.5.2 Etapas de la Planificación Sistemática de la Conservación

Se propone un plan secuencial para llevar a cabo el proceso de PSC, al final del cual se seleccionarían las mejores alternativas destinadas para la compensación del bofedal de Lagunillas:

i. **Identificación y descripción de los objetos de conservación:** Se deben identificar y describir claramente los objetos de conservación (bofedales equivalentes) dentro de los EBM. Esto implica recoger información acerca de sus atributos físicos, geográficos, ecosistémicos, entre otros, que se indican en el Anexo 3
ii. **Estados de Conservación**: Los estados de conservación de las especies se determinarán utilizando la información oficial del Proceso Nacional de Clasificación de Especies Amenazadas, complementada con análisis semi-automáticos basados en el criterio B de las UICN. Se asignará un factor de penalización a cada especie según su estado de conservación.
iii. **Identificación de las áreas de ocupación de las especies**: Mediante análisis espaciales y Modelos de Distribución de Especies (SDMs), se estudiará la distribución actual de las especies y determinará los niveles de representación necesarios para cada una. Estos análisis pueden variar dependiendo del área de ocupación de cada especie.
iv. **Establecimiento de las metas de conservación**: Definir metas claras y cuantitativas para cada objeto de conservación. Deberá incluir el análisis de porcentajes de conservación para los ecosistemas (10%, 17%, 30%, 50%), así como las metas específicas de representación para especies amenazadas, en función de su estado de conservación y endemismo.

v. **Análisis de Resiliencia Climática**: Se utilizarán Modelos de Distribución de Especies (SDMs) para proyectar la distribución potencial de las especies en escenarios futuros de cambio climático. Los resultados de estos análisis ayudarán a diseñar estrategias de conservación resilientes al cambio climático.

vi. **Desarrollo de alternativas de proyectos de conservación:** Con toda la información recogida y analizada, se deben desarrollar diferentes escenarios de conservación que cumplan con las metas establecidas y que sean resilientes al cambio climático. Se debe dar prioridad a aquellos que minimicen los costos y maximicen la biodiversidad.

vii. **Estimación de los costos de las alternativas de conservación:** Analizar los costos asociados con la implementación de las estrategias de conservación, teniendo en cuenta factores como el cambio en el uso del suelo, la pertenencia minera, y la disposición de los propietarios hacia la conservación in situ a largo plazo.

viii. **Implementación y seguimiento del plan de manejo adaptativo**: Una vez que se ha seleccionado el escenario de conservación más apropiado, el siguiente paso es implementarlo. Este proceso debe incluir el seguimiento continuo de los objetos de conservación y la evaluación periódica del éxito del plan en la consecución de las metas establecidas. Este plan, aunque detallado, debe ser adaptativo (ver sección 5.6), es decir, debe ser capaz de incorporar nueva información y cambiar en función de las condiciones cambiantes y los resultados del seguimiento. Esto garantizará que los esfuerzos de conservación sean lo más efectivos posible.

Al final de esta etapa se contará con mucha información, incluyendo múltiples criterios, para poder seleccionar las mejores alternativas de compensación. Se propone que la decisión final puede ser apoyada utilizando softwares de análisis multicriterio (ej: DEFINITE) que permitan ponderar cuantitativamente cada criterio, y así elegir entre las distintas alternativas en base a criterios objetivos y fundados en información científica.

5.6 ELABORAR PLAN DE MANEJO ADAPTATIVO

Tras seleccionar una alternativa de proyecto, se debe elaborar participativamente un plan de manejo de tipo adaptativo, cuya ejecución permita alcanzar los objetivos conjuntos planteados para el sitio de compensación, implementar las acciones diseñadas y monitorear y evaluar sus resultados. El manejo adaptativo constituye una forma de gestión de proyectos basado en el aprendizaje y la mejora continua, gracias a su carácter iterativo, a la inclusión de perspectivas de distintos grupos de interés y la toma en cuenta de las experiencias de manejo pasadas tanto en contenido como diseño.

La necesidad de generación de estrategias específicamente dedicadas al manejo adaptativo de recursos naturales ha derivado en la creación de herramientas especializadas que combinan los principios y mejores prácticas del manejo adaptativo en la gestión de tales recursos. Los Estándares Abiertos para la Conservación[33], y la Metodología de Evaluación de Oportunidades para la Restauración (ROAM[34]) son ejemplos de la generación de tales herramientas, obtenidas a partir de la implementación y revisión sistemática de resultados de proyectos para la práctica de la conservación y de la restauración de la biodiversidad, respectivamente.

5.6.1 Estándares abiertos para la conservación

Los Estándares Abiertos para la Práctica de la Conservación o Estándares de Conservación, creados por la Alianza para las Medidas de Conservación (Conservation Measures Partnerships), son un conjunto flexible de pasos secuenciales que se deben adaptar a los contextos socio-ecológicos específicos de los proyectos de conservación. Estos pasos promueven la inclusión, el manejo adaptativo y la colaboración con los actores involucrados. Además, se enfatiza la documentación transparente y el aprendizaje continuo. Los estándares se ajustarán con el tiempo para responder a nuevas necesidades, y su aplicación puede adaptarse a las realidades locales y las prioridades de conservación. En la Figura 4 se detalla el paso a paso de los EAC.

[33] Estándares Abiertos para la Practica de la Conservación. Alianza para las Medidas de Conservación (Conservation Measures Partnerships - CMP), 2020.
[34] ROAM

Figura 4. Ciclo del Proyecto según estándares abiertos para la práctica de la conservación.

5.6.2 Costos de los proyectos de conservación

Las variables de costos en el contexto de la planificación sistemática de la conservación se refieren a factores que pueden aumentar los gastos, reducir la efectividad o complicar la implementación de estrategias de conservación en áreas específicas (Margules y Pressey, 2000; Possingham et al., 2000, Bennett et al., 2014). Estos criterios se utilizan para evaluar y ponderar negativamente ciertas áreas u opciones, lo que ayuda a identificar aquellas que son más viables y beneficiosas desde una perspectiva de la conservación in situ a largo plazo.

Los costos asociados a la implementación de un plan de compensación podrían clasificarse, a grandes rasgos, en costos directos (i.e. gastos operacionales de implementación y manejo del plan de compensación) e indirectos (i.e. costo de oportunidades por cambio de uso de suelo) (ver Tabla 7). La magnitud de los costos asociados a cada ítem dependerá de la práctica de gestión utilizada como modelo de compensación, y en general, los gastos en la implementación de un plan de manejo serán significativamente mayores cuando el plan se basa en la Restauración de uno o más ecosistemas, comparado con uno basado en la Conservación de ecosistemas.

Tabla 7. Tipos de gastos generales asociados a la implementación de un Plan de manejo para la conservación o restauración de la biodiversidad

	Tipo de costo	Descripción	Ejemplos
DIRECTO	Gastos recurrentes: Salarios	Costos en personal	Salarios para personal permanente
	Gastos recurrentes: Operativos	Otros gastos de implementación	Monitoreo, protección/restauración, investigación, entrenamiento de personal
	Gastos en capital	Compras y modernización de instrumentos e instalaciones	Inversiones en edificaciones, estaciones climatológicas y monitoreo, equipamiento para personal
	Costos de establecimiento	Costos de establecimiento de área de protección	Costos de preparación del plan de manejo, marcaje de límites perimetrales, reuniones con stakeholders
INDIRECTO	Costos de oportunidad	Adquisición o arriendo de tierras	Adquisición o arriendo de tierras
	Costo por daños	Daños por fauna nativa a comunidades locales	Conflictos carnívoros/humanos por daño a ganado

Fuente: Modificado de Halsey, 2012.

Una vez determinado el o los sitios de compensación destinados a conservación, y esquematizado su respectivo plan de manejo, se podrá recién cuantificar los gastos directos de implementación, constituidos por gastos regulares y sencillos de medir.

Una primera aproximación para cuantificar el costo del cambio en el uso de suelo es generar una estimación a gran escala, utilizando análisis territorial que incluya información sobre la tenencia de la tierra[35] donde se espacializan los distintos proyectos de conservación de las diferentes alternativas de compensación, datos de pertenencia minera y levantamiento de información para evaluar la disposición de los propietarios hacia la conservación in situ a largo plazo[36]. Los costos de adquisición de territorios a dueños privados típicamente reflejarán sus costos de oportunidad, lo cual es conveniente pues evitaría posibles conflictos con partes interesadas y directamente involucradas (Naidoo *et al*., 2006).

Los costos de oportunidad, usados como proxi al precio de mercado de un territorio, se determinan calculando la probabilidad de que un área natural sea convertida a un uso de suelo de alguna actividad remunerativa, multiplicado por los beneficios netos esperados de tal tipo de uso de suelo y sumado para todos los tipos de uso de suelo (Naidoo & Adamowicz, 2006). Las probabilidades de conversión se pueden estimar en base a patrones históricos de la conversión de áreas naturales a otro uso de suelo en el sector o áreas afines de la región y, de no existir evidencia hacia la conversión del suelo a actividades remunerativas en las zonas en estudio, el área tendría cero costos de oportunidad para la conservación y un alto potencial para ser parte de una alternativa de compensación.

Tanto para gastos directos como indirectos del Plan de Compensación, el costo de conservación unificado de cada unidad de planificación (PU) se calcula sumando la proporción de superficie ocupada por áreas terrestres modificadas por actividades humanas, como zonas urbanas (carreteras, asentamientos y zonas industriales), así como otros tipos de modificaciones humanas como la minería. Además, se incluye la proporción de la superficie identificada como pertenencia minera y potencialmente la disposición relativa de los propietarios hacia la conservación in situ.

[35] Lo que requerirá un trabajo conjunto con Land Management Pampa Norte
[36] Considerar Derecho Real de Conservación Ley 20930

Algunos de los cálculos directos definidos en la alternativa de compensación desarrollada hasta la fecha (Templado y BHP, 2022) se muestran a continuación.

Tabla 8: Costos de la alternativa de compensación equivalente de Lagunillas elaborada hasta la fecha

Actividades claves	Miles USD
Estrategia de involucramiento de actores claves	$250
Caracterización impacto residual	$100
Actualización sitios preseleccionados	$150
Línea de Base sitio seleccionado	$400
Diseño Plan de Manejo de conservación	$150
Definición de instrumento legal de protección	$100
Definición de gobernanza	$100
Gestión de derechos de agua	$1,500
Gestión de Concesiones Mineras	$1,500
Habilitación sitio seleccionado	$1,000
Ejecución de la Medida (operación 350K por 25 años)	$12,000
Endowment para mantención de la gobernanza 5% año neto comisiones	$15,000
Total	**$32,250**

Fuente: Templado, 2022

Revisando el detalle de esta estimación de costos, se puede ver que la implementación de esta nueva ruta propuesta en este documento cumpliría con varias de las actividades claves. En total suman 1,25 millones de dólares, lo que parece un monto apropiado para la implementación completa de esta ruta.

Luego, para la operación de los proyectos de conservación, el enfoque propuesto en esta ruta, al dar una mirada regional y corporativa de la compensación, permite activar varias sinergias y reducir algunos costos. La co-construcción de alternativas junto con los stakeholders claves -considerados desde un comienzo- podría reducir considerablemente los costos de gestión de derechos de agua y de concesiones mineras. Se debe evaluar para cada caso, pero se podrían establecer esquemas de cesión o renuncia de derechos que podrían hasta eliminar ese costo (o reducirlo considerablemente).

También hay varias consideraciones sobre los costos del endowment y la ejecución de la medida por 25 años. En esta ruta se propone que los esfuerzos de compensación de Lagunillas sean parte de un esfuerzo conjunto a nivel regional de las distintas operaciones de BHP, con lo que se podrían construir fondos (de operación y de mantención) con costos repartidos entre los *assets*. Incluso, nuevos proyectos de la compañía podrían aportar a estos fondos, reduciendo considerablemente los costos totales. Otro punto importante en ese cálculo es el interés compuesto que estará acumulando el endowment durante los primeros 25 años, que parece no estar considerado.

5.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El caso del bofedal de Lagunillas es un ejemplo concreto de la explotación de los recursos naturales de un cuerpo de agua, donde las exigencias legales no fueron suficientes, y ni el monitoreo de variables ambientales ni las medidas de mitigación implementadas pudieron evitar un severo daño ambiental al ecosistema. El impacto ocurrió sobre especies únicas, muy vulnerables y con protección oficial del Estado chileno.

Este documento presenta un flujo de trabajo detallado para la construcción, selección e implementación de una o varias alternativas de compensación de los impactos sobre la biodiversidad del bofedal. El informe muestra una descripción exhaustiva del proceso, y debe tomarse como documento de referencia para la fase de formulación.

Este informe presenta una ruta clara y directa hacia la compensación, con una serie de etapas, pasos y criterios que van a permitir construir alternativas de compensación equivalente de Lagunillas. La decisión final de las metodologías específicas a utilizar está fuera de los alcances del equipo consultor, y debe considerar la opinión de otros actores claves, tanto dentro como fuera de la compañía.

Las metodologías y criterios presentados cumplen a cabalidad con lo exigido por la legislación nacional, y en algunos aspectos va incluso más allá. Este esfuerzo adicional pretende mitigar un riesgo inherente a un proyecto de compensación: la credibilidad de la equivalencia de la compensación, que mientras más completa y transparente sea, más creíble será. También busca incorporar variables ecológicas, sociales y económicas en la selección de alternativas, para asegurar la viabilidad a largo plazo de las alternativas de compensación.

Respecto al financiamiento de la alternativa actual de compensación, la estructura general de costos -gastos de implementación (USD 1,25 millones), fondo de ejecución (USD 12 millones) y fondo de mantención (USD 15 millones)- nos parece adecuada. Asume 350.000 dólares por año para cada proyecto de conservación, monto suficiente para estándares chilenos. Pero ambos fondos están sobre estimados. Como referencia, el presupuesto 2022 para el sistema nacional de áreas protegidas -entero- es de 30 millones de dólares. BHP Minerals Americas podría construir esos fondos con financiamiento compartido de sus distintas operaciones y utilizarlo para iniciativas de conservación y restauración en toda su área de influencia. Además, existen modelos público-privados de conservación donde luego de establecida el área de conservación, se dona al Estado (como el caso de Pumalín). Esto también podría reducir considerablemente los costos para la compañía.

6 ANEXOS METODOLÓGICOS

6.1 PASO 1: IDENTIFICAR LAS VARIABLES OBTENIDAS EN ESTUDIOS PREVIOS COMO INSUMOS PARA ESTIMAR LA AFECTACIÓN SOBRE LAGUNILLAS

Se ha identificado la ausencia de una línea base exhaustiva de los componentes abióticos y bióticos, previa la intervención industrial en el bofedal de Lagunillas que data de 1994, lo que resulta en una limitada capacidad para realizar una comparación precisa y empírica del estado ambiental del ecosistema antes y después del impacto[37] (CENIMA, 2010).

Para cuantificar la afectación del bofedal de Lagunillas es fundamental conocer las variables abióticas (por ejemplo, calidad y superficie del cuerpo de agua, entre otras) y bióticas (por ejemplo, composición de especies, cobertura vegetacional, entre otras) registradas en el bofedal en sus condiciones previas al proyecto. Para ello se debe realizar una búsqueda de información que considere variables históricas obtenidas *in situ* por estudios previos (artículos científicos, Carrasco *et al.,* 1993; 1994 y 1995), líneas base de otros proyectos, como también la adquisición y reconstrucción de información obtenida de manera indirecta, como es el caso del análisis de información satelital (Figura 5).

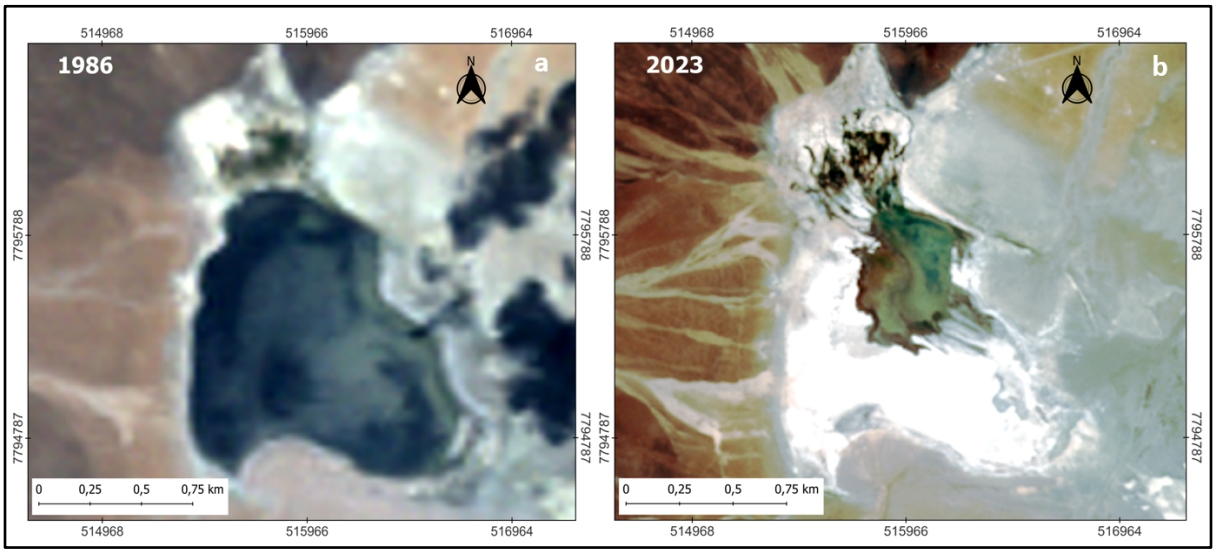

Figura 5. Cambio en la superficie del cuerpo de agua del Bofedal Lagunillas previo y posterior a la realización del proyecto. a) Bofedal en 1986 (Landsat 5 ™), y b) Bofedal en 2023 cerca del término de las operaciones (Sentinel 2).

En base a la búsqueda de información preliminar disponible, es posible afirmar que existen algunos registros históricos de criterios Climáticos e Hidrológicos (precipitaciones, pH y conductividad del agua, entre otros) y Biológicos a nivel de paisaje y composición (flora y fauna terrestre y acuática), que darían cuenta tanto de las

[37]CENIMA, 2010. Evaluación ambiental de pampa lagunilla. Informe elaborado por Centro de investigación en Medio Ambiente para BHP Billiton. Universidad Arturo Prat. Iquique Chile. 291 p.

condiciones anteriores a 1994 como de las actuales del área del bofedal Lagunillas. En particular, y como se observa en la Tabla 14 (Anexo 3), existen variables climáticas e hidrológicas que registran información histórica *in situ* desde el año 1993 hasta 2021. Además, mediante teledetección satelital es factible la obtención de información histórica, como por ejemplo la temperatura superficial del suelo (°C) de Lagunillas desde 1984 hasta 2022, entre otras múltiples variables ambientales.

6.2 PASO 2: DETERMINAR UN ECOSISTEMA DE REFERENCIA Y LOS ATRIBUTOS BIÓTICOS Y ABIÓTICOS QUE DEBEN SER FOCO DE COMPENSACIÓN

El siguiente paso es tener conocimiento sobre el estado de los componentes abióticos y bióticos del bofedal Lagunillas previo a la realización del proyecto, es decir, establecer un **ecosistema de referencia (ER)**. Esta definición es fundamental para determinar el impacto residual, como también las ganancias de biodiversidad en el o los sitios a compensar. Por lo tanto, para la reconstrucción del ER del bofedal Lagunillas, se deben considerar variables históricas, y con ellas obtener un modelo que informe una condición probable de este ecosistema previo a 1994.

6.2.1 Ecosistema de referencia

En el marco del estudio de referencia comparativa, los **componentes hidro-climático y geográfico** desempeñan un papel fundamental, ya que permiten identificar aquellos bofedales establecidos en condiciones ambientales similares al ER de Lagunillas, que servirán como punto de comparación para reconstruir los componentes bióticos en el bofedal de Lagunillas previa a la actividad industrial. A continuación, se describen los tres componentes del estudio de referencia comparativa:

- **Componente hidro-climático,** se refiere a todos los aspectos relacionados con el clima y la dinámica hidrológica del bofedal. Este componente incluye variables como la dinámica de las aguas subterráneas poco profundas y las temperaturas del aire (Scheihing y Tröger, 2018). Además, deben considerarse otras variables históricas como las precipitaciones.
- **Componente geográfico,** ayuda a comprender la ubicación y las características espaciales y de conectividad de la red de bofedales. Aspectos como la superficie del bofedal, elevación, índice de rugosidad topográfica, y los tipos de suelo tienen efectos directos en la biodiversidad.
- **Componente biológico**, los bofedales establecidos en condiciones ambientales similares al ER de Lagunillas servirán como punto de comparación para reconstruir los componentes bióticos en el bofedal de Lagunillas previa a la actividad industrial, lo que permite suplir parcialmente las carencias de línea de base biótica. Esta información permitirá inferir la afectación de la biodiversidad como consecuencia de la extracción de agua. La diversidad de especies, cobertura vegetacional y función ecológica de los bofedales serán indicadores claves para este objetivo.

Por lo tanto, en función a estos tres componentes, y mediante técnicas de análisis estadísticos multivariados de clasificación y agrupamiento de diferentes unidades (bofedales) es posible:

i) Delimitar la zona altoandina de Tarapacá en zonas hidro-climáticamente similares a las condiciones del ER de Lagunillas, considerando su proyección climática si no hubiese existido alteración antrópica.

ii) Identificar los factores geográficos que estructuran las comunidades de bofedales que son similares al o los ER de Lagunillas.

iii) Identificar aquellos bofedales que cumplan con la similitud ambiental, y que no se encuentren degradados, es decir bofedales naturales o con baja perturbación.

iv) Caracterizar las comunidades vegetacionales existentes en los bofedales que sean seleccionados en cuanto a sus indicadores de biodiversidad, considerando su composición, estructura y función. Así, el ER corresponderá a aquellos donde exista una intersección de los componentes hidroclimáticos y geográficos respecto de los existentes en el ER de Lagunillas, en cuanto exista una baja o nula perturbación antrópica en su componente de biodiversidad. Para ver el listado exhaustivo de las variables bióticas y abióticas que permiten describir cada componente ver la Tabla 15 en el Anexo metodológico.

6.2.2 Atributos de biodiversidad

Las métricas tradicionales para medir el impacto sobre la biodiversidad surgen del análisis del número de especies de un área determinada, la cobertura y la abundancia de especies nativas y exóticas (SEA, 2022). Sin embargo, la biodiversidad es compleja y está jerárquicamente organizada (Figura 6), abarcando cuatro niveles: i) genes, ii) poblaciones o especies, iii) comunidades o ecosistemas y iv) paisajes, los cuales están estructurados en tres dimensiones. Estas dimensiones son: **composición**, la cual refiere a la identidad y variedad de elementos en un área (Riqueza de especies, de genes, de ecosistemas, etc), **estructura**, que es la organización física del sistema (complejidad del hábitat en un ecosistema o patrón de parches a escala de paisaje) y **función**, la cual involucra procesos ecológicos y evolutivos (flujo génico, disturbios, ciclo de nutrientes). Bajo estas consideraciones se proponen un conjunto de métricas de la biodiversidad de importancia en la composición, estructura y función de los bofedales Altoandinos (Tabla 15 del Anexo 3).

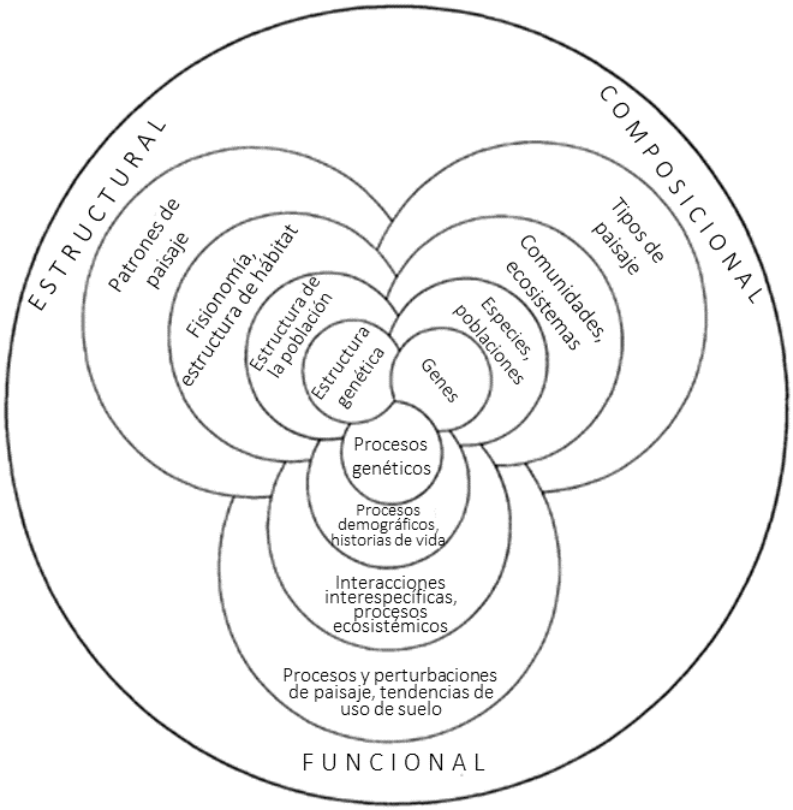

Figura 6. Jerarquías de la biodiversidad (Modificado de Noss, 1990).

6.3 PASO 3: CALCULO DEL IMPACTO RESIDUAL (IR), GANANCIA EN BIODIVERSIDAD (GB) Y GANANCIA NETA EN BIODIVERSIDAD

A continuación, se detalla la aplicación metodológica de la presente propuesta en el marco de la "Guía Metodológica para la Compensación de Biodiversidad en Ecosistemas Terrestres y Acuáticos Continentales" (SEA, 2023; ver Figura 7), la cual sugiere una metodología práctica para la cuantificación del impacto residual (IR) y de la ganancia neta de biodiversidad (GB) en el sitio o los sitios potenciales para implementar la compensación equivalente de bofedales azonales altoandinos de Chile.

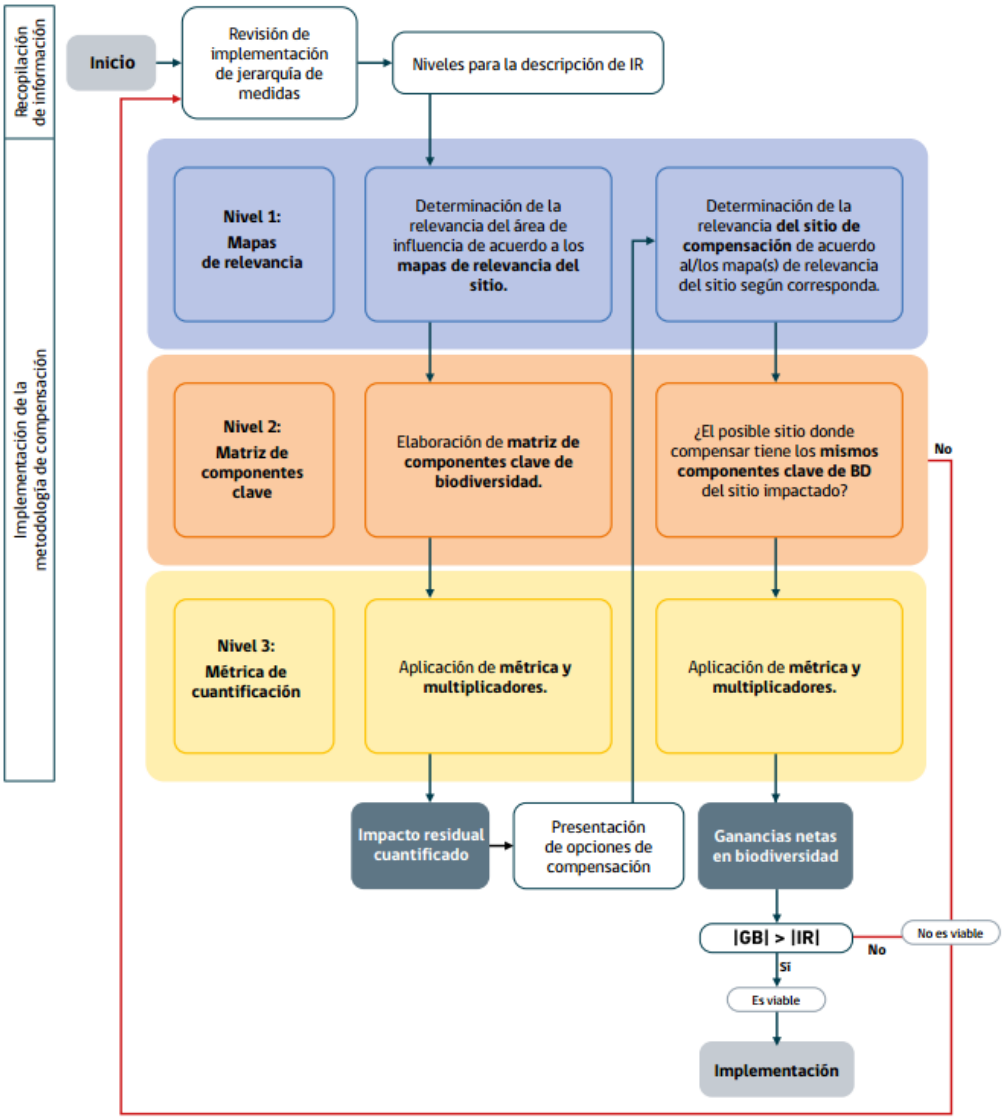

Figura 7. Resumen metodológico para aplicación de medidas de compensación equivalentes. Fuente: SEA (2023).

Mapas de Relevancia

De acuerdo con la Guía Metodología para la Compensación de la Biodiversidad del SEA (2022), es fundamental realizar en primera instancia una evaluación de la **relevancia del sitio**, la cual se ve representada en mapas[38] que fueron construidos de acuerdo con determinados objetivos e indicadores, buscando identificar las **prioridades de gestión para la conservación** en el marco de las compensaciones de biodiversidad. Ubicar el área de influencia y el o los sitios de compensación en estos mapas y reconocer su relevancia, constituye un primer acercamiento que permite tomar mejores decisiones, tanto del emplazamiento del proyecto como el sitio donde implementar la medida de compensación (SEA, 2022).

[38] SIMBIO

Para la elaboración de los mapas de relevancia de ecosistemas terrestres y acuáticos continentales se consideran diversos objetivos con sus respectivos indicadores, los cuales dan cuenta de las necesidades de incluir en la protección de la biodiversidad la escala de ecosistemas, abarcando propiedades como protección de ecosistemas amenazados, presencia de glaciares, entre otras (SEA, 2022). En base a los mapas de relevancia, se observa que el bofedal Lagunillas se encuentra emplazado en un sitio de relevancia baja para su componente terrestre (Figura 8), sin embargo, no posee una cuantificación de la biodiversidad a nivel de ecosistemas acuáticos (Figura 9), por lo cual es necesaria su evaluación. De manera conjunta, se evalúa la relevancia de ecosistemas terrestres y acuáticos para los **bofedales potenciales de compensación equivalente identificados en los pasos anteriores**. La relevancia de los ecosistemas determina el Multiplicador de Relevancia (M1) (ver Tabla 9), el cual define la superficie a compensar, y cuantas veces se debe multiplicar el IR para conseguir una compensación equivalente, de acuerdo con la guía SEA.

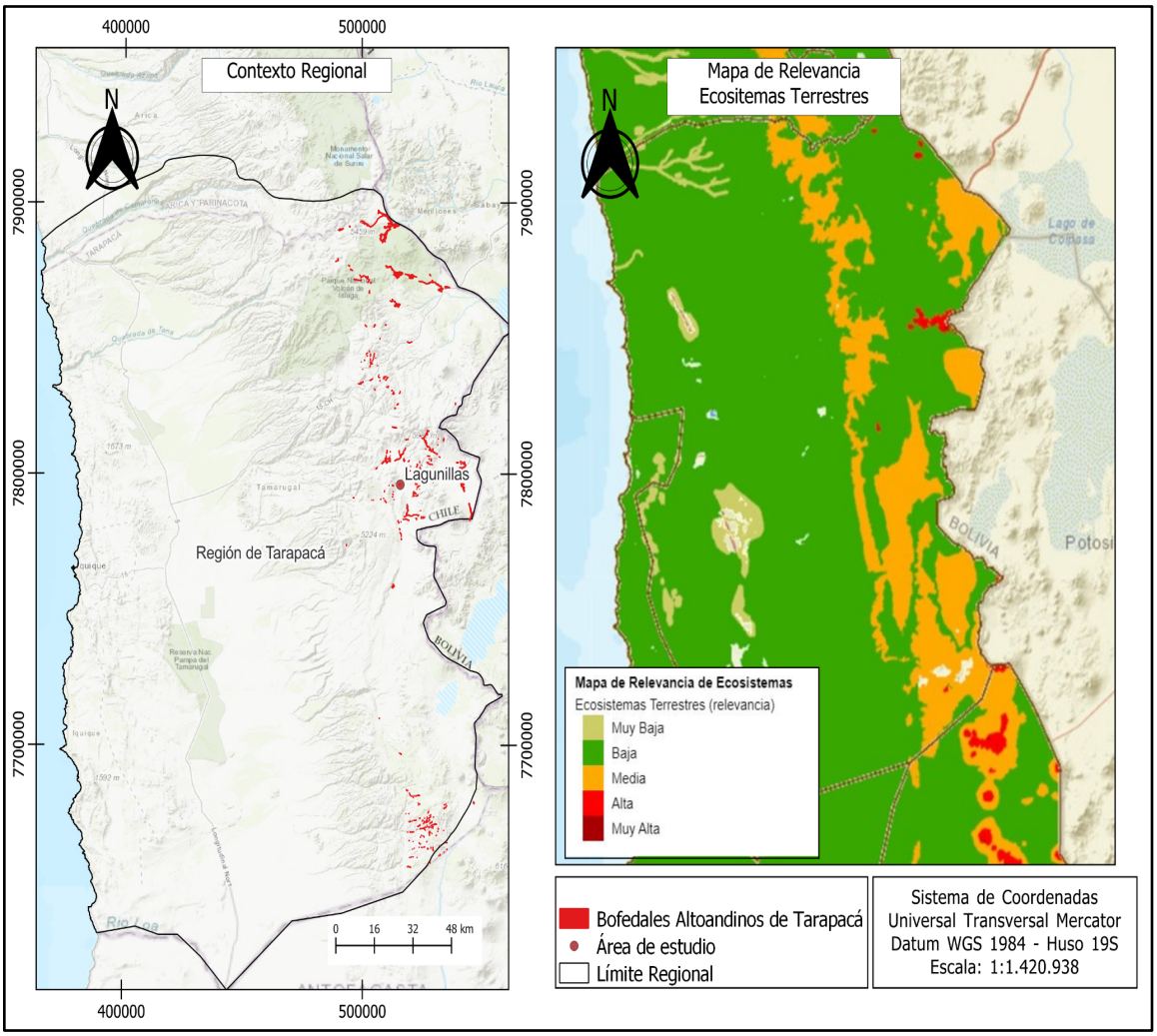

Figura 8. Mapa de relevancia de Ecosistemas Terrestres de la región de Tarapacá obtenido desde Geoportal SIMBIO (2023)

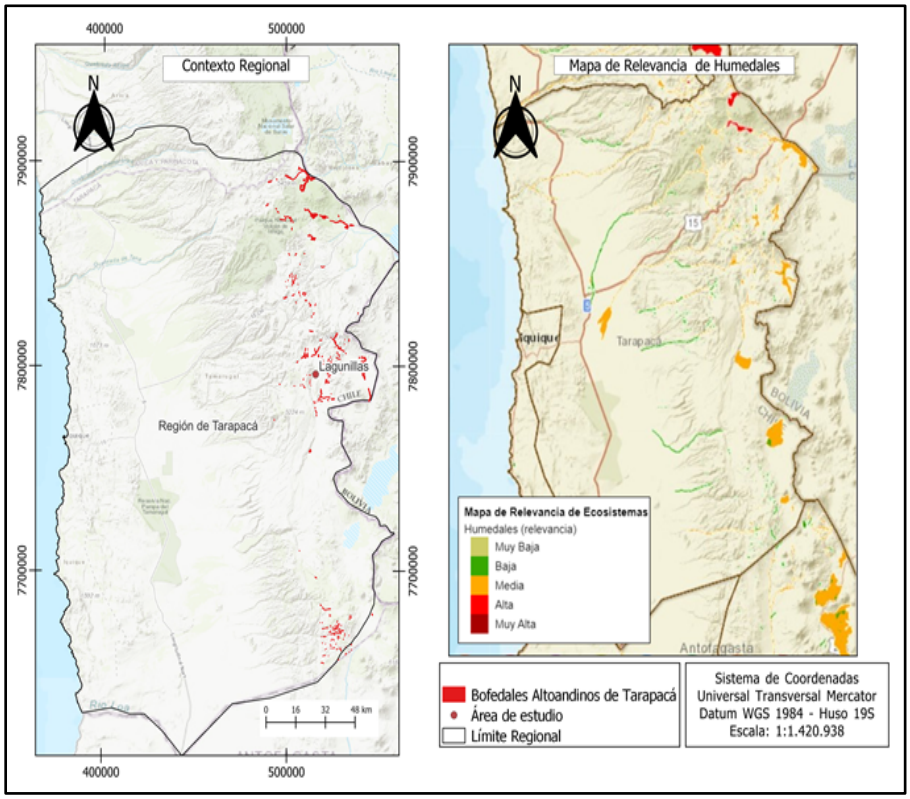

Figura 9. Mapa de relevancia de humedales de la región de Tarapacá obtenido desde Geoportal SIMBIO (2023).

Tabla 9. Multiplicador de relevancia del área de Influencia (M1)

Relevancia del Sitio	**M1**
Muy baja	1,2
Baja	2,4
Media	3,6
Alta	4,8
Muy alta	6,0

Matriz de componentes claves

El siguiente paso para la evaluación del IR es el cálculo del valor del cambio (“delta”), es decir la cuantificación de las variables bióticas y abióticas del bofedal (componentes claves de la **etapa 2**) en sus condiciones con y sin efecto de la ejecución del proyecto**.** Estas ecuaciones deben ser aplicadas para el sitio de influencia Lagunillas, como también para los sitios de compensación. En estos últimos se debe considerar que se alcanzan los resultados esperados por las medidas de compensación planificadas (condición final). Dadas las características propias de los bofedales, que

considera propiedades de ecosistemas acuáticos y terrestres, las variables deben ser evaluadas por separado ((Ecuación 1 y (Ecuación 2).

$$\delta\ de\ condición\ medio\ terrestre = \frac{(CfA - CiA)prom + (CfB - CiB)prom}{Vmax} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

δ de condición medio terrestre = diferencia de la condición de la biodiversidad del área de influencia entre su condición estimada sin proyecto y la que existirá con proyecto, al final de su ejecución;
CfA = Condición del Paisaje con Proyecto;
CiA = Condición del Paisaje sin Proyecto;
CfB = Condición del Ecosistema Terrestre con Proyecto;
CiB = Condición del Ecosistema Terrestre sin Proyecto;
Vmax = Valor promedio máximo de los parámetros.

$$\delta\ de\ condición\ medio\ acuático = \frac{(CfA - CiA)prom\ + (CfC1 - CiC1)prom\ + (CfC2 - CiC2)prom}{Vmax} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

δ de condición acuática = diferencia de la condición de la biodiversidad del área de influencia entre su condición inicial (sin proyecto) y la que existirá con proyecto, al final de su ejecución;
Cf = Condición con Proyecto;
Ci = Condición sin Proyecto;
A = Paisaje, obtenido de parámetros evaluados;
C1 = Condición del medio acuático, obtenido de parámetros evaluados;
C2 = Estructura de la comunidad, obtenido de parámetros evaluados;
Vmax = Valor promedio máximo de los parámetros.

Evaluación de Impacto Residual (IR) en bofedal Lagunillas

Luego del cálculo del valor del cambio ("delta") de la condición de la biodiversidad sin proyecto y con él en Lagunillas, se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$IR = \delta\ de\ condición\ AI\ \times\ área\ (en\ ha) \times M1\ área\ de\ influencia \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

δ de condición AI = diferencia de la condición de la biodiversidad del área de influencia entre su condición inicial (sin proyecto) y la que existirá con proyecto, al final de su ejecución;
Área (en hectáreas) = superficie del área de influencia cuya biodiversidad fue impactada negativamente;
M1 = Valor entregado por mapas de relevancia del sitio (Ver Figura 8, Figura 9 y Tabla 9).

Ganancia neta en biodiversidad (GB) en sitios potenciales de compensación

Por otro lado, una vez diseñada la medida de compensación, es posible calcular la GB, para lo cual es necesario utilizar todos los Multiplicadores indicados en SEA (2022): Multiplicador de Relevancia (M1), Multiplicador de Localización

(M2), Multiplicador de tiempo requerido para obtener ganancias (M3), y Multiplicador por tipo de protección Legal (M4); cuyos valores se detallan en la Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, respectivamente.

$$\boldsymbol{GB} = \frac{\boldsymbol{\delta}\ de\ condición\ \times\ área\ (en\ ha)\ \times\ M1\ sitio\ de\ compensación}{M2\ \times\ M3\ \times\ M4} \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

Tabla 10. Multiplicador de Localización (M2)

Sitios de compensación respecto del impacto	M2
Mismo piso vegetacional o ecosistema del inventario de ecosistemas del MMA	1,0
Misma cuenca	1,5
Cuenca limítrofe o vecina	2,0
Distinta cuenca, pero dentro del mismo ecotipo/tipología de ecosistema	3,0

Tabla 11. Multiplicador de tiempo requerido para obtener ganancias (M3)

Años entre impacto y compensación en funciones	M3
< 7 años	1,0
7 a < 9	1,2
9 a < 11	1,4
11 a < 13	1,6
13 a < 15	1,8
15 o más	2,0

Tabla 12. Multiplicador por tipo de protección Legal (M4)

Tipo de Manejo	M4
El sitio de compensación cuenta con protección mediante un mecanismo formal que asegura el resguardo del patrimonio natural existente a perpetuidad, por ejemplo, Derecho Real de Conservación, iniciativa privada de conservación con reconocimiento oficial del Estado o figuras de protección legal emprendidas por gobiernos locales.	1,0
Existe un contrato entre el propietario del sitio y quien ejecuta la medida de compensación el cual se extiende durante todo el tiempo proyectado para la ejecución de la medida, incluyendo el tiempo	3,0

requerido para su seguimiento, sin que exista una figura legal de protección de los componentes de la biodiversidad, que son objeto de la compensación.

Finalmente, para que la compensación sea adecuada debe cumplirse que la Ganancia en Biodiversidad (GB) en el sitio de compensación debe ser igual o mayor que el impacto Residual (IR) en valores absolutos, lo que se expresa de la siguiente manera:

$$|GB| \geq |IR| \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

6.4 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DE COMPENSACIÓN EQUIVALENTE

La guía para la compensación de la biodiversidad en el SEIA, sustentada en el artículo 100 del Reglamento del SEIA[39] y en concordancia con diversos estudios, precisa que para alcanzar una compensación efectiva de la biodiversidad, es esencial que los componentes, estructura y la funcionalidad de los ecosistemas, sean similares a los del área afectada en su condición previa a la implementación del proyecto (Darbi *et al.,* 2009.; Alonso *et al.,* 2020; SEA, 2022a).

Dichas áreas deben considerar el contexto del paisaje y el rango de la variación de sus elementos para asegurar su viabilidad ecológica y sostenibilidad a largo plazo. Así, se establece que la compensación debe realizarse en un lugar cercano al área de influencia del componente afectado, preferentemente dentro de la misma región administrativa, esto último con el objetivo de integrar el criterio de justicia ambiental (SEA, 2022). Por ello, en la presente propuesta se establece como área de análisis la zona altoandina de Tarapacá (Figura 10).

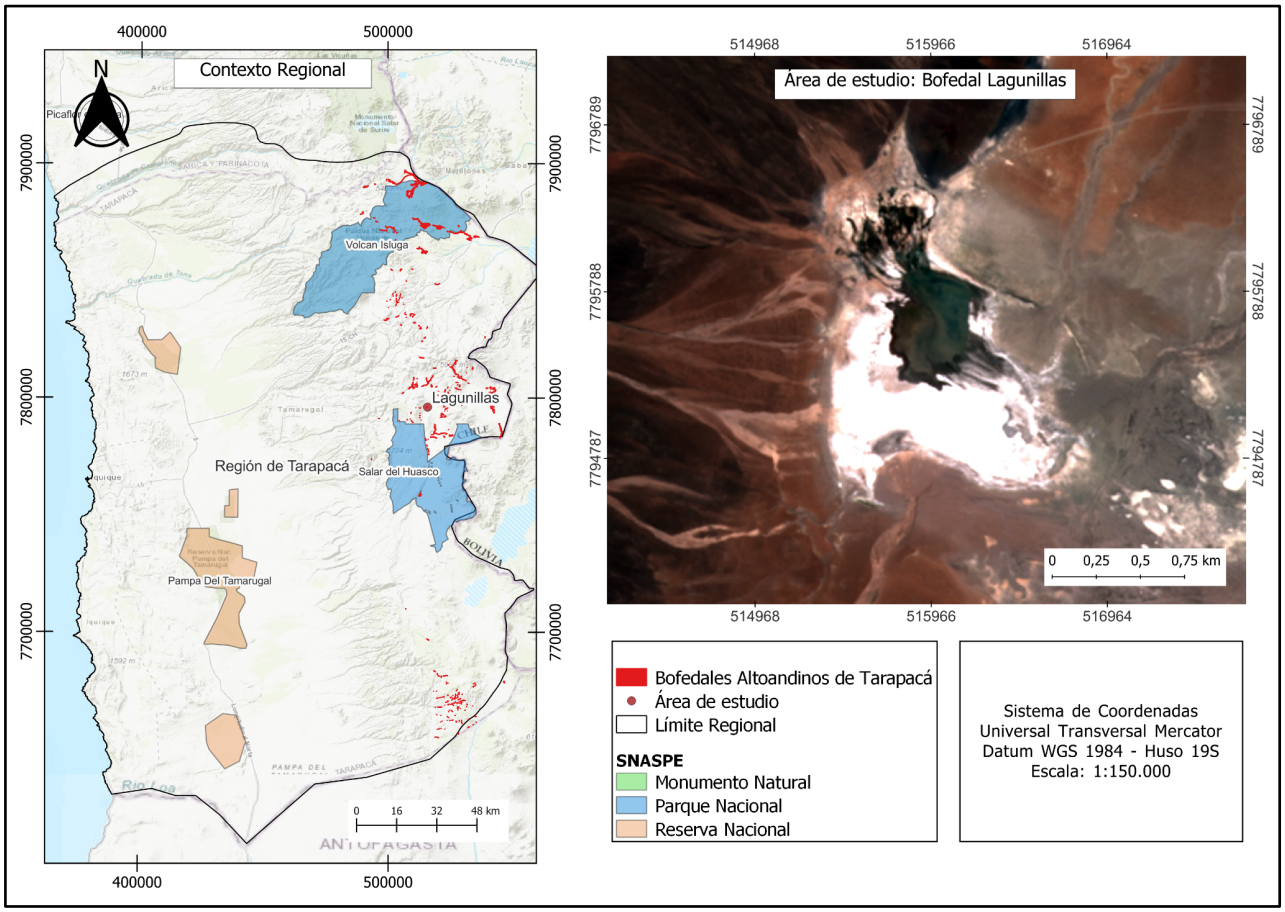

Figura 10. Mapa de bofedales altoandinos de Tarapacá (destacados en rojo).

[39] Ref. artículo 100 Decreto 40, Ministerio del Medio Ambiente

Por otro lado, la normativa chilena vigente exige que la compensación debe realizarse cumpliendo criterios de **equivalencia y conectividad** (SEA, 2022).

La **equivalencia** se refiere al balance entre la biodiversidad perdida en el sitio impactado y la biodiversidad ganada en el o los sitios de compensación, buscando obtener una pérdida neta cero de biodiversidad, y que la sustitución de la biodiversidad perdida sea con otra similar en nivel, composición, estructura y función (OCDE, 2016; SEA, 2022).

Por su parte, la **conectividad** hace referencia al flujo de diversidad (migraciones de organismos, flujo genético o similitud funcional y evolutiva; Kool *et al.,* 2013). Mientras que la equivalencia resiste comparaciones simples como balance entre número de especies perdidas y ganadas/conservadas, la conectividad exige aproximaciones específicas para el tipo de especies y/o de paisajes (Moilanen y Kotiaho, 2018).

La metodología que se detalla a continuación tiene como objetivos primordiales la identificación de lugares estratégicos en los cuales implementar acciones de compensación, con miras a lograr avances sustanciales en la biodiversidad, así como establecer los criterios biológicos que requieren compensación. El enfoque se centra en determinar áreas que, si bien están fuera del impacto directo del proyecto, presentan una equivalencia ecológica. Para que un ecosistema sea reconocido como equivalente, debe someterse a una rigurosa evaluación mediante el uso de métricas detalladas en la Guía Metodológica de Compensación del SEA, que permita clasificarlo como un bofedal altoandino de similares atributos biológicos y servicios ecosistémicos respecto del bofedal Lagunillas antes del inicio de la operación de CMCC.

Por lo tanto, para la determinación y selección de áreas válidas para compensación (= bofedales equivalentes) que cumplan con los criterios de **equivalencia y conectividad** siguiendo los niveles de la biodiversidad (genética, especie/población, comunidad/ecosistema y paisaje) reconocidos por la autoridad ambiental se propone seguir cuatro lineamientos:

1) A nivel de comunidad/ecosistema y paisaje: *Selección de sitios de alta similitud* con metodología indicada en Paso 2 y evaluar conectividad a escala de paisaje.
2) A nivel de especie/población y comunidad: Identificar especies y comunidades que son objeto de conservación de acuerdo a la normativa nacional.
3) A nivel de diversidad genética: evaluar la conectividad genética, con el fin de seleccionar áreas con un flujo génico similar Lagunillas, y evitar áreas demasiado aisladas para prevenir la homogeneización genética.

Estos métodos no solo permiten caracterizar conectividad y equivalencia, sino también suman como criterios para evaluar la mejor opción de compensación.

Las metodologías para 1) y 2) son reconocidas y se mencionan en la Guía Metodológica de SEA (2022) con el detalle suficiente, sin embargo, la conectividad genética no tiene metodologías explícitas por lo que se entrega en mayor detalle a continuación.

Conectividad genética:

En el campo de los estudios comparativos, la conectividad genética proporciona una aproximación cuantitativa a la continuidad y dispersión de la biodiversidad a través de paisajes. La filogeografía, disciplina que utiliza herramientas moleculares para examinar la estructura genética de las poblaciones y la evolución geográfica (Avise et al., 1987), resulta esencial para medir la conectividad genética. Dentro de este marco, el grado de parentesco y el flujo génico entre poblaciones de la misma especie son indicadores cruciales para determinar la conectividad (Moritz & Faith, 1998). Este parámetro permite incluir el nivel genético de la biodiversidad dentro de la caracterización de los

ecosistemas (AI y sitio de compensación), complementando así los requisitos de una medida de compensación adecuada según lo propuesto en la Guía Metodológica (SEA, 2022). Su uso permite definir de manera cuantitativa y precisa 1) el nivel de conectividad funcional que existe entre parches de hábitat a nivel de paisaje y 2) la diversidad genética como parte de la estructura de la comunidad de especies en el ecosistema, atributo con potencial de constituir un componente clave para la conservación de la diversidad biológica local.

En la región de Tarapacá, en el norte de Chile, los bofedales, ecosistemas de humedales altoandinos, tienen una distribución fragmentada tipo "islas" debido a la variabilidad geográfica en la disponibilidad de agua. Esencialmente, ciertas especies de plantas son claves para la comunidad y el ecosistema ya que al tener crecimiento en forma de cojines compactos modifican el microclima. Este tipo de especies se conocen como ingenieras ecosistémicas (Badano y Cavieres 2006). Para evaluar la conectividad genética entre los bofedales, se proponen los siguientes pasos:

1. Identificar aquellas especies que son abundantes o que cumplen roles funcionales críticos en los bofedales y diseñar un protocolo de muestreo para recolectar tejido vegetal. Este protocolo debe asegurar una cobertura geográfica que represente adecuadamente la región en estudio.
2. Extracción de ADN y secuenciación de marcadores hipervariables (microsatélites o SNPs).
3. Evaluación de la diversidad genética, estructura poblacional y flujo genético.
4. Análisis de correlación entre distancias genéticas.
5. Modelado SIG de la conectividad genética del paisaje.

Además, es recomendable utilizar modelos de distribución de especies para proyectar cómo los cambios ambientales futuros podrían afectar la distribución y conectividad de las poblaciones ante escenarios de cambio climático ("análisis de resiliencia").

6.5 LINEAMIENTOS PARA LA IDENTIFICACIÓN Y MAPEO DE ACTORES DE LAS ALTERNATIVAS DISPONIBLES

La identificación y mapeo de actores asociados a cada alternativa de compensación aportará a los criterios de selección de la alternativa más conveniente y será un insumo clave para la articulación de su gobernanza, el diseño y ejecución de su plan manejo adaptativo.

El propósito de esta metodología es describir proceso de mapeo de actores y grupos clave de interés para las distintas alternativas de proyectos de compensación, para utilizarlo en el caso del sitio del Bofedal de Lagunillas. Los resultados del mapeo de actores se utilizarán en dos instancias: (i) durante el proceso de selección del proyecto de compensación a implementar, que contará con participación de las comunidades relacionadas a Lagunillas y; (ii) sus resultados debieran ser parte de los del análisis de viabilidad de las alternativas en evaluación.

Independientemente de las acciones de compensación elegidas, la realización de un mapeo de actores ayuda a cumplir con la voluntad de BHP de generar "valor social"[40] como una contribución positiva a la sociedad, la economía, las comunidades locales, los socios estratégicos, los accionistas y el medioambiente, ya que su filosofía de entrega de valor social está basada en un enfoque "*bottom-up*" dónde se integran a los proyectos contribuciones de parte de los agentes (actores) que reciben este valor social.

A su vez, la política de pueblos Indígenas de BHP[41] propone el objetivo de fomentar la confianza, la participación temprana y la inclusión de perspectivas indígenas en el diseño y la implementación de sus iniciativas con el objetivo de generar beneficios mutuos.

Además, de acuerdo con las notas de orientación de biodiversidad[42] de la compañía, cuando una iniciativa involucra riesgos y oportunidades asociadas a biodiversidad, se debe vincular con las distintas partes interesadas, realizando consultas, encuestas de terreno, entre otros insumos relevantes para incorporar su visión. El documento también menciona específicamente que el diseño de acciones de compensación debe acompañarse de una evaluación (*scoping*) en una consulta con actores relevantes. De hecho, BHP declara en estas notas de orientación, que los atributos de biodiversidad y servicios ecosistémicos más importantes son aquellos importantes para los grupos de interés en cuestión.

Por último, cabe señalar, que internamente BHP ha reconocido que en relación con los "*legacy Issues*", será clave entender las expectativas de los distintos actores que tienen un interés en dichos sitios para diseñar soluciones sustentables.

Tomando en cuentas estos antecedentes, es fundamental identificar todos los grupos de interés vinculados al proyecto de compensación (directa o indirectamente), así como sus potenciales intereses y expectativas, para incluirlos tempranamente en distintas etapas del proyecto (diseño, gobernanza, implementación, evaluación, mejora

[40] Referirse al documento "*Social Value Efforts Priorisation Minerals Americas*"

[41] Referirse a los documentos "*Global Indigenous Peoples Strategy*", "*Indigenous People's Plan Minerals Americas South America FY19-FY2*3" y "Pueblos Indígenas - Declaración de Política (versión del 9 de noviembre 2022)".

[42] Referirse al documento "*Biodiversity Guidance Note, Version 1.0 (February 2021)"*

continua), reconociendo así el potencial de los mapeos de actores cómo fuente de información para generar estrategias inclusivas en BHP.

6.5.1 Metodología de mapeo de actores:

Identificar, mapear y analizar los actores clave en un proyecto que involucra gestión sobre la biodiversidad, los recursos naturales y servicios ecosistémicos, consiste primero que todo en entender las relaciones complejas que mantienen los seres humanos con los recursos de los cuales dependen[43].

La identificación y el mapeo de grupos de interés debiesen ser realizados temprano en la gestión de un proyecto, para recopilar información respecto de los actores potencialmente afectados o beneficiados, las capacidades de estos actores para influir sobre el proyecto, las relaciones pasadas, presentes o futuras entre estos actores, los potenciales usos que los actores tienen de los servicios ecosistémicos (SSEE) vinculados al proyecto y los potenciales conflictos respecto de estos SSEE[44].

Los grupos de interés se pueden clasificar en distintas categorías:
Actores clave: cualquier individuo, comunidad, grupo u organización con alto interés en uso de los recursos y SSEE del área de compensación y con alto poder de influenciar significativamente sobre el éxito o fracaso del proyecto. Son los principales aliados para la generación de un plan de manejo adaptativo, por lo tanto, es importante que se generen coaliciones, colaboraciones y buenas relaciones de trabajo con ellos.

Actores primarios: cualquier individuo, comunidad, grupo u organización con alto interés en el uso de los recursos o SSEE, pero bajo poder en la toma de decisiones o; con alto poder en la toma de decisiones pero bajo interés en el área, los SSEE asociados y/o el proyecto de compensación.

Actores secundarios: todos los otros individuos, grupos u organizaciones que tienen un interés o un rol intermedio en el proyecto de compensación efectiva y sus consecuencias, con una importancia relativa menor a las demás categorías de actores.

Es importante tener en cuenta los siguientes puntos respecto de los grupos de interés:

i. Un actor puede pertenecer a más de uno de estos grupos.

ii. Los actores no solamente son “locales”, incluyen gobiernos y personas u organizaciones que no necesariamente se ubican cerca del sitio de compensación.

iii. Los actores no solamente son organizaciones y grupos formales, pueden incluir personas, comunidades o grupos informales.

iv. Los actores no solamente son usuarios de los SSEE del sitio de compensación, también pueden ser personas, grupos (formales o informales) u organizaciones que tienen un impacto directo o indirecto sobre el sitio de compensación.

[43] Renard, Y., 2004. Guidelines for Stakeholder Identification and Analysis: A Manual for Caribbean Natural Resource Managers and Planners. Caribbean Natural Resources Institute. ISBN 1-890792-07-1

[44] *“Actor” o “grupo de interés” en este documento,* se refiere a *"cualquier individuo, comunidad, grupo u organización interesada en el resultado de un programa, ya sea que resulte afectada positiva o negativamente, o bien por ser capaz de influenciar la actividad o programa de manera positiva o negativa"*

v. Nuevos actores pueden volverse relevantes y actores pasados volverse triviales para el proyecto.

Este último punto es importante sabiendo que el proyecto de compensación equivalente deberá implementarse a largo plazo.

Para complementar la identificación de actores, y en un ejercicio que permite avanzar en la construcción de la matriz interés-poder (presentada más adelante en este documento), se debe intentar responder las siguientes preguntas para identificar más actores y evaluar la relevancia de los actores listados hasta este momento:

i. ¿Quiénes son los beneficiarios o los que utilizan recursos del sitio de compensación?

ii. ¿Quiénes potencialmente podrían sufrir impactos negativos del proyecto de compensación?

iii. ¿Quiénes tienen derechos -todos; actuales e históricos, otorgados y en reclamación- sobre los recursos?

iv. ¿Quiénes tienen la facultad de impactar los recursos o servicios del sitio de compensación?

v. ¿Quiénes tienden a no ser incluidos en las negociaciones vinculadas al proyecto de compensación?

vi. ¿Quiénes tienden a presentar resistencia al proyecto?

vii. ¿Quiénes podrían ser facilitadores del proyecto?

viii. ¿Quiénes cuentan con recursos financieros, capacidades o de información en relación al sitio y proyecto de compensación?

ix. ¿Quiénes pueden influir en el éxito del proyecto?

Para contestar estas preguntas se deben realizar observaciones en terreno, conversaciones con actores clave, revisiones bibliográficas y de datos disponibles relativos a la experiencia de la compañía en el territorio, entre otros.

Una vez consolidada una lista de actores, conviene identificar una representación válida para cada parte interesada que corresponda a un grupo u organización.

Mapeo de actores

Con la lista de actores se puede desarrollar una tabla de mapeo de actores, que permite identificar potenciales alianzas e interacciones entre actores que tienen intereses similares (Tabla 13).

Tabla 13. Ejemplo tabla de mapeo de actores

Actor	**Interés en el proyecto**	**Nivel de facilitación u obstaculización al proyecto**	**Estrategias para obtener el apoyo o reducir la oposición**
Actor 1	Beneficiario	Alto nivel de facilitación, es un interlocutor válido a escala local capaz de convencer a otras partes interesadas	Mantener comunicación constante, involucrar en desarrollo del proyecto.
Actor 2	No es beneficiario ni perjudicado, pero tiene una vinculación de larga data con el territorio. No habita el territorio pero si lo visita frecuentemente con fines recreativos. Considera que el proyecto puede restringir su acceso al sitio.	Nivel bajo de obstaculización, no tiene mayor incidencia en otros actores.	Invitar a dialogar, buscar soluciones a sus inquietudes, incorporar sus apreciaciones dentro del desarrollo del proyecto.

Matriz de Interés-poder

Contando con esta lista de actores definida, se debe realizar una matriz de interés-poder. Esta herramienta permite visualizar la influencia relativa y el nivel de interés de cada actor, también permite identificar grupos de actores con intereses similares y anticipar potenciales alianzas y coaliciones. La generación de coaliciones es especialmente válida para actores con poco poder y alto interés en los SSEE y los atributos de biodiversidad del área de compensación, o con el proyecto en general.

El poder de un actor se refiere al grado de influencia que tiene para incidir sobre otros actores, instituciones o tomadores de decisión, ejerciendo un peso sobre sus acciones y decisiones.

El interés de un actor se refiere a la importancia que tiene para ellos la habilidad de ocupar, acceder a o su dependencia de los SSEE y/o los atributos de biodiversidad área de compensación, independientemente de si disponen efectivamente de esta habilidad en el momento de la evaluación. También se refiere a las ganancias o pérdidas que enfrentaría el actor debido a las consecuencias del proyecto de compensación, las cuales son directamente vinculadas a la disposición del actor a tomar acción directa[45].

Para realizar la matriz de interés-poder, se le asigna un valor en una escala de 1 a 10 (escala cualitativa) al interés y poder de cada uno de los actores identificados.

La evaluación del poder de cada actor puede ser guiada por las siguientes preguntas:

i. ¿De quién depende el actor?
ii. ¿Qué actores pertenecen a organizaciones más amplias?
iii. ¿Quiénes controlan recursos (materiales o inmateriales)?
iv. ¿Quiénes controlan la información disponible?

La evaluación del interés de cada actor puede ser guiada por las siguientes preguntas:

i. ¿El actor tendría una ganancia significativa al tener acceso al área de compensación, los SSEE o recursos en cuestión?
ii. ¿El actor sufriría una perdida significativa al perder acceso al área de compensación, los SSEE o recursos en cuestión?
iii. ¿El actor tiene alguna ganancia o pérdida en caso de éxito o fracaso del proyecto?
iv. ¿Quiénes son susceptibles de estar a favor o en contra del proyecto?

Una vez que estos valores son otorgados, es posible catalogar a los actores como clave, primarios o secundarios según las definiciones dadas previamente. A su vez, es posible ubicar a los distintos actores en una matriz con el grado de poder en el eje vertical y el grado de interés de los actores en el eje horizontal, lo que los posiciona en un determinado cuadrante que permite analizar posibles estrategias de relacionamiento con ellos (ver Figura 11).

[45] Mayers, J., 2005. Stakeholder power analysis. Power Tools. International Institute for Environment and Development., (March), p.24. Available at: http://www.policy-powertools.org/Tools/Understanding/docs/stakeholder_power_tool_english.pdf.

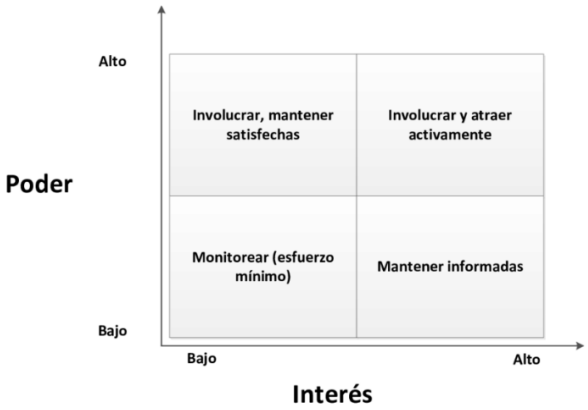

Figura 11. Estructura de la Matriz de Interés o matriz de Mendelow[46].

De esta forma, la ubicación de cada actor en la matriz informa el tipo de gestión que se deberá realizar para cada actor o grupo de actores: involucrarlos y mantenerlos satisfechos, involucrarlos activamente, informar, y monitorear. La estrategia de gestión también puede ser otra que resulte más pertinente al proyecto. A su vez, este ejercicio también ayuda a identificar actores que pueda ser de interés movilizar de un cuadrante a otro. Por ejemplo, un grupo de mucho poder, pero poco interés, podría ser de interés estratégico el incrementar su interés, de modo que actúe como un facilitador del proyecto o que entregue mayores garantías para su éxito.

Diagrama de actores

Diagramar a los actores también es otra herramienta útil para visualizar los actores identificados con poder y/o interés en un el proyecto. La Figura 12 representa un ejemplo de estructura de diagrama.

[46] Elaboración propia a partir de Mendelow, A., (1991). Stakeholder Mapping. Proceedings of the 2nd International Conference on Information Systems. *Cambridge, MA*, *5*(2), p.61; Project Management Institute. (2017). A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide) (6th ed.). Project Management Institute; Low, Christopher & Cowton, Christopher. (2004). Beyond stakeholder engagement: the challenges of stakeholder particpation in corporate governance. International Journal of Business Governance and Ethics. 1. 45-55. 10.1504/IJBGE.2004.004896.

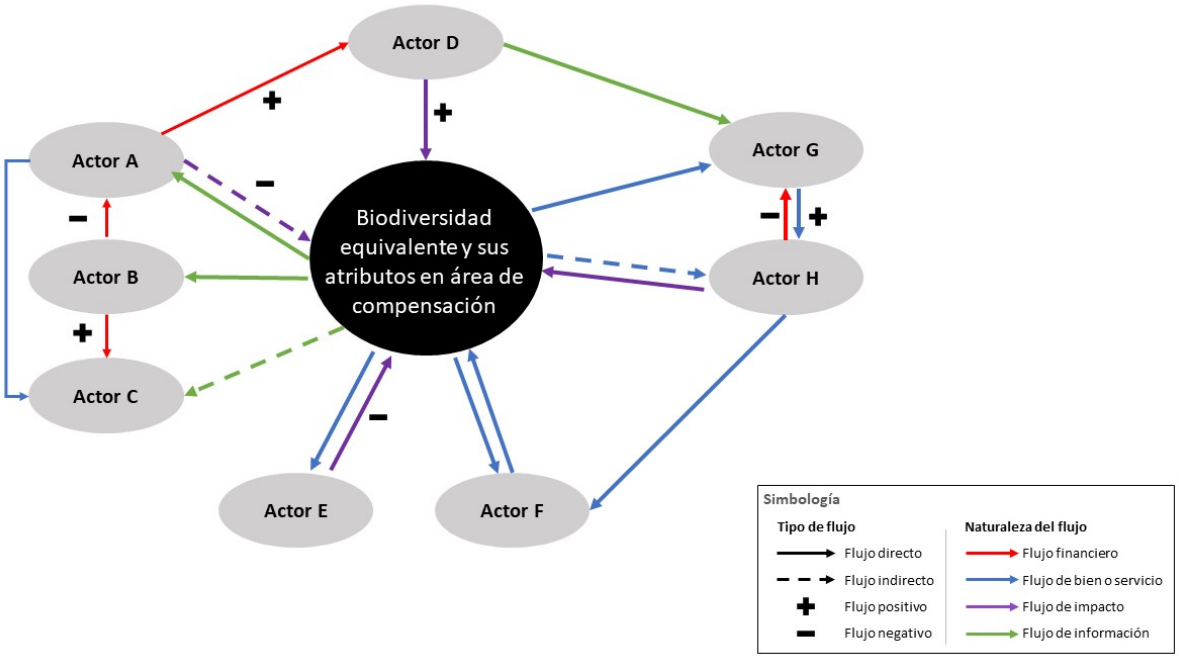

Figura 12. Ejemplo diagrama de interacción entre actores del sitio de compensación.

La identificación, el mapeo y el análisis de actores es un paso importante y se debe realizar temprano en un proceso de compensación equivalente de biodiversidad. Es importante notar que, dado que cada situación y territorio son únicos, los mapeos de actores son herramientas de análisis que permiten entender un contexto particular, por lo que cada mapeo puede ser actualizado constantemente a medida que se van incorporando o retirando actores con poder y/o interés en el proyecto.

Por último, este proceso de mapeo también puede constituir una herramienta de monitoreo del cambio del contexto, permitiendo la identificación de problemas emergentes. Contar con el mapeo de actores también informa el proceso de involucramiento de grupos de interés en los proyectos, priorizando ciertos actores para la recibir retroalimentación y anticipando potenciales conflictos.

7 METODOLOGÍAS PARA LA DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS OBJETOS DE CONSERVACIÓN DE CADA ALTERNATIVA DE COMPENSACIÓN

7.1 OBJETOS DE CONSERVACIÓN

Los objetos de conservación se definen en dos escalas: (a) macro, tipo de ecosistemas (bofedal equivalente u otros IBEs), y servicios ecosistémicos; (b) micro, especies (estados de amenaza). Cada objeto de conservación en cada unidad de planificación se expresa en función de su área.

7.1.1 Indicadores a nivel ecosistémico

Se analizarán los bofedales equivalentes y otros IBEs identificados dentro de los EBM de CMCC. Cada unidad debe estar caracterizada en términos de su biodiversidad para poder ser incluida en el modelo de decisión, además de atributos físicos, geográficos, ecosistémicos, etc. Sus atributos más relevantes son aquellos que se utilizan para el cálculo de ganancia neta de biodiversidad (sensu SEA 2022).

En términos ecológicos, se ha demostrado que una mayor riqueza de especies o diversidad taxonómica (TD) aumenta la estabilidad de las comunidades frente a las perturbaciones (Grman et al., 2010). Sin embargo, esta métrica considera a todas las especies como evolutivamente independientes y funcionalmente equivalentes, ignorando así el hecho de que la pérdida de ciertas especies puede tener un mayor impacto en el legado evolutivo y en el funcionamiento del ecosistema (Faith, 1992; Tilman, 2001; Petchey y Gaston, 2006; Swenson, 2011; Pellens y Grandcolas, 2016; Mammola *et al.,* 2020, Cadotte *et al.,* 2018). Para abordar estas limitaciones, se han incorporado métricas que describen otras dimensiones de diversidad, tales como la diversidad filogenética (PD) y funcional (FD) (Faith, 1992; Webb et al., 2002; Petchey y Gaston, 2006). Específicamente se propone la utilización de las siete "Variables Objeto de Compensación" (VOC), que corresponden a indicadores de biodiversidad que permite caracterizar detalladamente cada ecosistema de las distintas alternativas de compensación, y así poder seleccionar la mejor alternativa. Los indicadores acá propuestos son indicativos, y será el equipo de implementación quienes deberán definir cuales utilizar, de acuerdo con la información disponible.

7.1.1.1 *Diversidad taxonómica (TD)*

La métrica más utilizada de diversidad α es la riqueza taxonómica (*TD*), la cual corresponde al recuento del número de especies diferentes en un área determinada, y se puede expresar como la suma del taxón *t* en cada cuadrante de ubicación *i* y *j* (Laffan *et al.,* 2008). Este índice será medido a nivel de especie.

$$TD_{ij} = \sum_{t \in Ti \cup Tj} t \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

t = taxón de cada cuadrante de ubicación *i* y *j.*

7.1.1.2 *Diversidad Filogenética (PD)*

Es el equivalente filogenético de TD, y se define como la suma de las longitudes de rama encontradas en el cuadrante de ubicación *i* y *j*, donde las ramas son la ruta mínima que conecta a tales taxa con el antecesor común más reciente. Si en un cuadrante están presentes todos los taxa, la *PD* será la suma de todas las longitudes de rama (Faith, 1992; Rosauer *et al.,* 2009). Valores comparativamente más altos indican una mayor divergencia filogenética local.

$$PD_{ij} = \sum_{\lambda \in \Lambda i \cup \Lambda j} L\lambda \qquad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

L = Longitud de la rama de ruta mínima entre los taxa de ubicación *i* y *j* y su antecesor común más reciente;
λ = conjunto de ramas encontradas en el conjunto de ubicaciones de *i* y *j*.

7.1.1.3 *Diversidad Funcional (FD)*

La diversidad funcional (FD), expresada en términos del índice *FD*, se estimará mediante el análisis del dendrograma de rasgos, sumando la longitud de las ramas de un dendrograma funcional elaborado a través de un análisis de conglomerados. Por lo tanto, mide el grado de las relaciones funcionales compartidas por las especies en una comunidad (Petchey y Gaston, 2006). Valores comparativamente más altos indican una mayor divergencia funcional local.

$$FD_{ij} = \sum_{\lambda \in \Lambda i \cup \Lambda j} L\lambda \qquad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde:

L = Longitud de la rama de ruta mínima entre los taxa de ubicación *i* y *j* y su antecesor común más reciente;
λ = conjunto de ramas encontradas en el conjunto de ubicaciones de *i* y *j*.

7.1.1.4 *Endemismo Taxonómico (WE)*

Para la estimación del endemismo taxonómico se utilizará el índice de endemismo ponderado (*WE*), el cual se define como la distribución del endemismo en un espacio geográfico compuesto por celdas u otras unidades de comparación (Williams *et al.,*1996; Linder, 2001), donde valores altos de este índice indicarían centros de endemismo.

$$WE_{ij} = \sum_{\in \Lambda i \cup \Lambda j} \left(\frac{1}{Ci}\right) \qquad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde:

Ci = número de unidades o celdas en las cuales se encuentra el taxón *i*.

7.1.1.5 *Endemismo Filogenético (PE)*

Para identificar patrones geográficos de endemismo filogenético (predominio de linajes evolutivos restringidos a una región específica), se utilizará el índice de endemismo filogenético (*PE*) descrito por Rosauer *et al.,* 2009. Valores altos cercanos a 1 indicarían centros de linajes evolutivos endémicos.

$$PE_{ij} = \sum_{\in \Lambda i \cup \Lambda j} \left(\frac{Lc}{Rc}\right) \qquad \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

Lc = longitud del largo de la rama con relación a una filogenia;
Rc = área de distribución para cada clado.

7.1.1.6 *Endemismo Funcional (FE)*

Los patrones geográficos de endemismo funcional (predominio de especies que poseen conjuntos rasgos funcionales particulares a una región específica), se utilizará el índice de Endemismo Funcional (FE). Donde los valores altos cercanos a 1 indicarían centros de especies con conjuntos rasgos funcionales particulares a una región específica (Poch, 2022).

$$FE_{ij} = \sum_{\in \Lambda i \cup \Lambda j} \left(\frac{Lc}{Rc}\right) \qquad \text{(Ecuación 11)}$$

Donde:

Lc = longitud de la rama con relación al dendrograma de rasgos UPGMA;
Rc = área de distribución para cada clado funcional.

7.1.2 **Indicadores funcionales**

7.1.2.1 *Condición de la vegetación (sanitaria)*

Los índices espectrales de vegetación como estimadores de la producción primaria anual, proporciona una medida directa de la capacidad de una formación vegetacional para mantener la productividad a pesar del estrés hídrico relativamente alto.

En particular para la evaluar las formaciones vegetacionales establecidas en ecosistemas áridos, como lo son los bofedales altoandinos, se recomienda la utilización del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), el cual es un índice de vegetación derivado del NDVI, cuya intención es incluir las variaciones radiométricas que induce la presencia de zonas con escasa cobertura vegetal, como las que se dan en ambientes semiáridos.

Una vez terminada la etapa de preselección de áreas y análisis e identificación (bofedales equivalentes y oasis de neblina), estas se mapean en los EBM y se definen unidades de planificación (UP). Las regiones de Tarapacá y Antofagasta se dividirán en UPs hexagonales de 25 km^2, aunque se recomienda usar UP de menor superficie.

7.1.2.2 *Servicios Ecosistémicos*

Los servicios ecosistémicos serán abordados íntegramente mediante una identificación participativa[47], donde uno de los servicios a evaluar, corresponde *a priori* a los usos culturales de las especies. Se establecerán metas que tomarán en cuenta el número de usos de las especies. Se generará un índice ponderado donde se dará prioridad a las especies con un mayor número de usos en el proceso de optimización del modelo. La recopilación de información sobre los usos de las especies se llevará a cabo a través de una exhaustiva revisión de la literatura, así como mediante la realización de entrevistas a residentes locales, líderes comunitarios, científicos, entre otros.

7.1.3 Indicadores a nivel de especie

7.1.3.1 *Estados de Conservación*

Para obtener los estados de conservación de las especies se propone utilizar la información oficial basada en el Proceso Nacional de Clasificación de Especies Amenazadas (DS/MMA, 2007-2023). Pero debido a que este proceso aún está en curso será necesario complementar con análisis semi-automáticos de estados de conservación basados en el criterio B de las UICN a través de softwares, como por ejemplo la librería conR disponible para R (Daubi et al., 2017).

Se aplicará un factor de penalización a las especies ("SPF") en función de sus estados de conservación donde especies con mayor nivel de amenaza tienen un valor alto de SPF, y las especies de menor preocupación tienen un valor bajo de SPF. La calibración de los pesos específicos de penalización debe ajustarse usando análisis de sensibilidad (Duarte et al., 2014), mediante softwares, como Zonae Cogito (Segan et al., 2011).

7.1.3.2 *Áreas de ocupación*

El objetivo de representación para cada especie se define a partir del área de ocupación. Los umbrales deben ajustarse de acuerdo con las características de las especies estudiadas. Algunos umbrales objetivo comúnmente usados son el 100% de la distribución de cada especie con un área de ocupación inferior a 500 km^2, el 20% de la distribución de cada especie con un área de ocupación superior a 125.000 km^2 y el 20-100% de la distribución de cada especie con un área de ocupación superior a 125.000 km^2 (Wilson et al., 2005). Para inferir la ocupación se realizará una compilación exhaustiva de ocurrencias provenientes de literatura, herbarios y prospecciones en terreno en las KBAs. Se realizarán matrices de presencia y ausencia, y se utilizarán Modelos de Distribución de Especies (SDMs). Estos análisis de SDMs se pueden realizar utilizando diferentes softwares disponibles, se recomienda el uso de la librería "BIOMOD2" para R (Thuiller et al., 2016).

7.1.3.3 *Resiliencia Climática*

Para evaluar el impacto del cambio climático, se emplearán Modelos de Distribución de Especies (SDMs) para analizar la distribución potencial de las especies y proyectarla en escenarios futuros de cambio climático en softwares como la librería "BIOMOD2" para R (Thuiller et al., 2016). Los modelos proyectados en escenarios de cambio climático brindarán una aproximación de cómo podrían cambiar las áreas de ocupación de las distintas especies en el futuro, y podemos evaluar este efecto en el diseño de red de conservación. Los análisis de PSC se realizarán considerando las áreas de ocupación actuales ("b. Área de ocupación"), comparado con diferentes escenarios de conservación bajo modelos predictivos de cambio climático, con el fin de evaluar la resiliencia de las especies al cambio climático.

[47] Solicitar nota técnica de identificación participativa de servicios ecosistémicos a Medio Ambiente Regional.

7.1.3.4 *Distintividad evolutiva*

Esta variable puede ser estimada mediante el índice w-May y el índice de Faith (May 1990; Faith 1992; Duarte et al., 2014). Para ello, se debe generar una filogenia molecular para las especies de plantas vasculares que se encuentran en las KBAs. Para ello se sugiere utilizar búsquedas en Genbank a través de sistemas semi-automáticos como la librería phruta de R (Román-Palacios, 2023). Luego complementado con la obtención de muestras frescas de plantas mediante trabajo de terreno con el objetivo de secuenciar especies faltantes y completar los vacíos de información de Genbank. Una vez obtenida las secuencias se propone generar un árbol de consenso obtenido mediante inferencia Bayesiana. Para obtener el índice w-May se aplica la función “tax. Distinctiveness” disponible en el paquete Picante (Kembel et al., 2010) en R 2.14.0 (R Development Core Team, 2009). El índice w-May se convierte en un porcentaje que varía entre el 0% y el 100% de la distribución de la especie, y este porcentaje se define como el objetivo de ocurrencia características (Duarte et al., 2014).

8 ANEXO 1 – REVISIÓN HISTÓRICA DE ANTECEDENTES

8.1 CONCLUSIONES DE LAS AUDITORÍAS AL PLAN DE MANEJO DE 2016 Y 2023

Marco principal de la recomendación	Recomendaciones generales de la Revisión externa Independiente del Plan de Manejo de Lagunillas de 2016	Recomendaciones específicas (2016)	Mejoras, debilidades y recomendaciones formuladas en la Revisión externa Independiente de la Implementación del Plan de Manejo de Lagunillas de Marzo 2023
Integración de la información	**Consolidar la información disponible** y los datos asociados al Plan de Manejo Ecosistémico	**Centralizar y sistematizar** la información en carpetas específicas, corregir variabilidad en el nivel de detalle de la información Asegurarse de que toda la información de monitoreo este **presentada** e **analizada** para su integración en los reportes e informes	Hay falencias de conocimiento de varos aspectos del ecosistema que no permiten anticipar futuros impactos negativos (uso del bofedal por la comunidad) que podrían afectar su recuperación. La información está bastante fragmentada en general. Falta integración de los datos para generar mejoras en las futuras actualizaciones del plan de manejo. La presentación de resultados es a veces incompleta (en el informe de Plan de Manejo de Funciones Ecosistémicas del Sistema Lacustre de Lagunillas), por ejemplo, faltan evoluciones temporales en evapotranspiraciones y un análisis por cobertura de suelo. Tampoco se presenta la ubicación de puntos de evapotranspiración a monitorear en el informe 2021. La información no siempre se presenta de manera clara y hay ciertos vacíos de información, (fechas de recuperación estimadas, no hay registro de los niveles observados en 2001 para ciertos pozos) Sistematizar y actualizar planillas (periodos de calibración, niveles de referencia...) Consolidar toda la información del Plan y sus Actualizaciones en 1 solo documento. Fomentar la sistematización del análisis estadístico y de tendencias históricas.
Metodología y herramientas	Robustecer **métodos** de evaluación y monitoreo	*__evapotranspiración__, con métodos de escalas amplías que los domos: Covarianza de vórtices o escintilómetro	La metodología de domos está bien documentada y es adecuada para mediciones puntuales, y el monitoreo de la evapotranspiración en estos puntos es exitoso. Falta evaluar la evapotranspiración a mayor escala Para mejorar la detección de cambios no deseados, necesidad de complementar el método de domos con:

		- Información de niveles piezométricos del acuífero somero - Series horarias de evaporación potencial (definir impacto de condiciones meteorológicas) - Integración de datos históricos para mejorar la probabilidad de detección de cambios - método de “Eddy Covariance” o Escintilometría
	*para **niveles freáticos**, con predicción de caudal, evaluación de propiedades hidráulicas, mejorar la caracterización de aguas subterráneas.	Se presentaron informes trimestrales de aguas fon flujos bombeados, y los niveles cumplieron con la RCA (13/2022) de caudal total de extracción operacional inferior a 83 L/s, con un volumen de extracción en los límites otorgados. No se cumplió el compromiso de cambiar el punto de extracción desde el pozo P3 a un pozo PR a partir de 2022 (a la fecha aún se extrae agua por P3), y no se informa el caudal medio mensual extraído por el pozo PR para el SRA (solo el caudal instantáneo)
	*para **Cobertura vegetal**: Método de punto intercepto para la cobertura de especies / Uso de imágenes satelitales (LANDSAT TM, índice MSAVI)	El Plan (actualización 2021) cumple con requisitos (res 67/11) de mantención de un 70% de cobertura de especies propias del bofedal. Se usan imágenes Satelitales desde 2008 y distintos índices de actividad de la vegetación (MSAVI, NDVI) El MSAVI este indice minimiza el efecto del suelo desnudo en el Indice de Vegetación. Ciertos informes no mencionan este análisis. El cambio de indice entre los informes genera discontinuidad en los análisis y prohíbe comparaciones. Se omiten informaciones en ciertos reportes. Las mediciones de intercambio de gases permiten evaluar el desempeño fisiológico de las plantas puntualmente y bajo condiciones específicas Pero estas mediciones son contexto-dependientes, no se señala cómo se seleccionan los sitios de medida de la fotosíntesis, este método no permite tener una visión ecosistémica o holística
	*Considerar métodos más directos para evaluar el **desempeño fisiológico de las plantas**	El Plan (actualización 2021) mide la disponibilidad de nutrientes en el agua Pero no mide la productividad ni la herbívora sobre la producción de macrófitos y microalgas, La función ecosistémica de secuestro de carbono no se mide. CMCC solicitó en 2006 monitorear la calidad del agua, pero no se indica cuál es el nivel de variación de calidad del agua aceptable, cómo este se medirá y si estos parámetros tienen impacto sobre la vegetación

Metodología y herramientas	**Justificar** los métodos usados	en las instancias de monitoreo, evaluación, definición del ecosistema de referencia y generación de modelos conceptuales y numéricos. Especificar en los informes **eventuales modificaciones** aportadas a los métodos	Incorporar en informes las referencias literarias que justifican las actualizaciones de los modelos (ej: Clasificación de acuíferos según Struckmeyer y Margat). En general, se necesita comparar los métodos alternativos usados y la información histórica para integrar y resolver la sobreposición entre metodologías en uso (Ej: Fotografía área no tripulada e imágenes satelitales)-
Integración de la información	**Comunicación** entre equipos de monitoreo	Para **sistematizar los métodos** y escalas de monitoreo, su formato de entrega y sus metodologías de análisis e interpretación	Los cambios en métodos de análisis de la información dificultan las comparaciones en el tiempo. En ciertas ocasiones, falta reportar los cambios metodológicos efectuados. Necesidad de asegurar el alineamiento de los métodos usados en el análisis de Lagunillas con los métodos pedidos por la RCA. Falta formalización de procedimientos de gestión, sistematización de análisis críticos y de capacidades en el equipo ambiental Necesidad de un equipo ambiental con mayores capacidades de análisis e integración de la información para garantizar la factibilidad de la implementación del Plan.
Integración de la información	**Analizar e interpretar** los datos sistemáticamente	Con métodos estandarizados y robustos	Faltan análisis de tendencias cronológicas en: Riqueza, abundancia, NDVI.
Metodología y herramientas	Complementar las actividades de restauración con **experiencia internacional**	Revisar **literatura** y encontrar estudios de sitios con características similares o experimentos exitosos de acciones de conservación con objetivos similares	NA
Metodología y herramientas	**Validar** y **calibrar** los modelos	Para numéricos y conceptuales, realizar medidas en terreno, o procesos de "ground truthing" para verificar la **validez de las simulaciones** en la **realidad**.	**Modelo Hidrogeológico** actualizaciones del modelo hidrogeológico fueron generadas en 2019, 2020 y 2021 pero no en el mes de Julio que fue el mes comprometido y faltó la actualización del 2022. Se aportaron mejoras como redefinición de las unidades hidrogeológicas, con un modelo hidrológico semi-distribuido para estimar la recarga (integrando temperatura, precipitación, evapotranspiración potencial). El modelo fue calibrado con información de la cuenca vecina, lo que dio valores coherentes de permeabilidad y almacenamiento, y un error adecuado del modelo en general. No se han generado las validaciones de los modelos numéricos con los

			niveles observados de años anteriores. a pesar de los requerimientos de la RCA, no se validó el modelo numérico de 2021 con 30% de la información disponible. Hay zonas dónde todavía se necesita afinar la calibración, los niveles profundos y someros del acuífero todavía no se ajustan a los valores observados en todas las zonas Se recomienda validar los modelos numéricos y presentar los niveles observados, (evaporación, caudal, sublimación...) comparándolos con los descensos máximos fijados en la RCA (67/2011). Hay buen uso de las pruebas de bombeo en el área para estimar la infiltración y conductividad hidráulica. Agregar al modelo las pruebas de bombeo en las áreas que faltan (bordes sur, sureste, norte). Se realizó en 2021 un análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica, almacenamiento de la unidad de depósitos aluviales y recarga global para estimar los errores del método, lo que permitió validar la calibración del modelo. La incorporación de pilot points (44) permitió mejorar la precisión del modelo. Las propiedades hidráulicas en los bordes de la cuenca no coinciden con el modelo conceptual porque el modelo desconecta las cuencas de Lirima y Collacagua de Lagunillas. (diferencias de permeabilidad), en consecuencia, zonas saturadas de resistividad baja no fueron incorporadas en el modelo numérico (Ej: borde norte) Falta mejorar el ajuste de algunos pozos, (sectores Laguna y LA-02, Río Lacho, zona bordeando la cuenca de Collagua) dónde los niveles simulados están subestimados, o hay diferencias entre tendencias simuladas y observadas.
Integración de la información	**Sistema de Recarga Artificial (SRA):** Enfatizar la existencia del **bofedal artificial** asociado al pozo artesiano de Lirima.	**Integrar** la información sobre el bofedal artificial y el pozo en la **monografía** o el documento de síntesis para integrarla al **Plan de Manejo** para sacar conclusiones en cuanto a la **situación post-cierre** y el **término** de las actividades de **recarga** artificial e irrigación	Se garantizó la **disponibilidad de agua para el SRA**, y se estableció un sistema de control de volumen de agua utilizada para el SRA. CMCC también certificó la veracidad de la información entregada. Falta validar los datos de los pozos relacionados al SRA con métodos alternativos como pozómetros manuales. El caudal de extracción máximos para el SRA ha sido respetado entre julio y Septiembre 2022 (Inferior a 25 L/s) Se señala que hay una recarga superficial que no proviene del acuífero del campo de pozos, pero no se analiza si el SRA aporta agua con algunos elementos químicos que no son adecuados por el bofedal ni si esto afecta los pronósticos de recuperación del bofedal.

Integración de la información	Generación de una **monografía** o libro	Producir **publicaciones** evaluadas por pares que contenga al menos la información y los datos integrados justificando el plan de manejo	NA
Integración de la información / Metodología y herramientas	**Comunicar** y difundir la información	Tras su validación, **disponibilizar** la información, haciéndola **accesible** y definir un plan de difusión de la información del plan de manejo de manera transparente con hitos relevantes.	No se comunican con claridad las fechas de recuperación de los niveles de 2001
Integración de la información / Mirada funcional	Mejora del entendimiento de ciertas variables e **Identificación de tendencias** en las variables ecosistémicas estudiadas	Generar conocimiento sobre tendencias pasadas y futuras (dinámicas poblacionales, procesos ecológicos…)	Se hizo seguimiento al flujo de vertientes, evapotranspiración, humedad del suelo, nivel de agua subterránea y superficie de la laguna. Se recomienda presentar la totalidad de los datos históricos en los informes para detectar los cambios no deseados
Integración de la información / Mirada funcional	Integrar en los modelos conceptuales los **vínculos entre distintas variables**, componentes y funciones ecosistémicas	*entre **biodiversidad** y **funciones ecosistémicas:** Definir el rol de cada especie en las dinámicas ecosistémicas y destacar especies indicadoras	El Plan (actualización 2021) señala su ambición de medir la recuperación de funciones ecosistémicas, pero no define las funciones ecosistémicas en cuestión. No se integra la información sobre los nutrientes en contextos de funciones ecosistémicas. Integrar los datos de fotosíntesis y evapotranspiración en un modelo para una visión más completa de los cambios en el ciclo de agua y carbono (usando un Sistema de Covarianza de Eddy) Lo que permitirá luego correlacionar la tasa de intercambio de CO_2 con las mediciones puntuales para generar un balance ecosistémico del uso de carbono y agua y relacionar estos flujos con variables ambientales (disponibilidad de agua, cobertura vegetal)

		*Asociar variables **bióticas y abióticas**	Se declara que el Plan de Manejo 2021 tendrá un enfoque integrado, asociando distintas variables ambientales, pero el modelo ecosistémico es un modelo cerrado no incluye la cuenca (sólo toma en cuenta el movimiento de aguas desde el acuífero subterráneo al bofedal y la laguna) Para la modelización de las interrelaciones entre el acuífero el bofedal y la laguna que sostienen flujos de nutrientes y cadenas tróficas, no se definen claramente umbrales de respuesta biogeoquímicos, ni cómo se miden ni cómo se simulan.
		*Explicitar el rol de **nutrientes y carbono** en la **dinámica ecosistémica**	El plan (actualización 2021) señala un aporte de nutrientes y carbono desde el bofedal hacía la laguna No mide estas conexiones funcionales. Faltan conocimientos sobre el impacto del movimiento de nutrientes sobre la productividad del ecosistema
		***Modelo hidrogeológico:** Integrar la **relación entre agua superficial y agua subterránea** en el modelo hidrogeológico. Usar **modelos continuos** (método pilot points) para modelizar los recursos hídricos. Mejorar el conocimiento de las propiedades de infiltración del suelo y potenciales fuentes externas de recarga o descarga y su impacto sobre la humedad del suelo.	Globalmente el punto no fue resuelto. Se generaron investigaciones de terreno (geofísica, geología, perforaciones, monitoreo de niveles de gradientes. Se incorporó "upstream Weighting" al modelo actualizado (2021) para tomar en cuenta las celdas secas. No se generó un modelo numérico local de aguas subterráneas de la zona. El modelo numérico más actualizado (2021) no simula precisamente los niveles de agua subterránea de los acuíferos ni el funcionamiento de la laguna. No se han incorporado al modelo hidrogeológico los niveles y superficies de la laguna Huantija Faltan datos recientes de la estación meteorológica (P3) (para estimar evapotranspiración potencial a partir de datos meteorológicos) Mejorar la calibración del sector Humedal-laguna y representar de mejor manera los procesos hidrológicos superficiales (incorporando la laguna y considerando el la interacción de de la zona no saturada y aguas superficiales con vertientes y quebradas, con paquetes LAK y Streamflow). monitorear diferentes variables meteorológicas usando los datos de la estación meteorológica. Se usa in modelo continuo desde 2021 integrando variables de precipitación, temperatura, y evaporación diarias, considerando evaporación real, escurrimiento infiltración y almacenamiento con calibración en la cuenca del Huasco. Queda pendiente validar los resultados in situ. Se incorporó un método con pilot points al ajuste 2021, que generó un buen ajuste de tendencias. Permitió relejar bastante bien las tazas de descenso en ciertos pozos. Se desconoce la presencia de conexiones hidrogeológicas con las cuencas

			vecinas. Revisar la calibración por zona, para mejorar la capacidad de predicción del modelo Realizar un análisis de sensibilidad de las conexiones con otras cuencas para evaluar conexiones con cuencas vecinas (especialmente en estratos de mayores profundidades y zonas de mayores conductividades hidráulicas en el borde del bofedal) para entender mejor los flujos entre cuencas y su impacto en el balance de Lagunillas Realizar un análisis de las pruebas de bombeo y un estudio hidrogeoquímico de las zonas de conexión para definir la naturaleza de los acuíferos (confinados, libres, semiconfinados) y la presencia de zonas de recarga o bordes impermeables y determinar el origen de las aguas y conexiones hidrogeológicas. El análisis actual de descarga no incorpora zonas de bofedal y deja de lado ciertas zonas con importante evaporación (zonas de suelo húmedo dónde la evaporación supera la evapotranspiración del bofedal), esto genera incertidumbre en el balance hídrico. Considerar la influencia del nivel de la napa del acuífero sobre la evaporación real y potencial. Para eso, realizar estimaciones de evaporación a partir de curvas normalizadas dependientes de la cobertura y de la profundidad de la napa. Evaluar la salinidad de la laguna y su influencia en la evaporación. El balance Hídrico de la zona debe considerar la piezometría (en la estimación de los flujos de evaporación).
Mirada funcional	Realizar un estudio de la **resiliencia** del sistema	y generar **modelos predictivos** de la relación humedad vegetación pastoreo para reforzar la **resiliencia** del plan. Investigar en profundidad y con base teórica la capacidad de adaptación y tolerancia fisiológica de las especies del bofedal. Esto requiere un rediseño estudios ecofisiológicos con salidas a terreno, análisis de laboratorio e integración de la	Para cumplir con la RCA (13/2022) Se revisaron escenarios de recuperación con: - 1. Sin cambio climático, sin medidas preventivas - 2. Con cambio climático y con medidas preventivas - 3. Con cambio climático y Sin medidas preventivas 2 pozos no cumplen con el requisito de recuperación prescrito en la RCA con el escenario 3 1 pozo no cumple con el requisito de recuperación prescrito en la RCA con el escenario 2

		información sobre las especies clave	
Integración de la información / Mirada funcional	Tomar en cuenta el **cambio climático**	y **su efecto** sobre los ostros elementos del ecosistema (agua, especies, suelo…) **Diferenciar fluctuaciones** debidas a procesos climáticos regionales y las causadas por fenómenos locales o antropogénicos.	Se incorporó el cambio climático global en la actualización del modelo hidrogeológico numérico de 2021 (usando datos históricos del CR2MET y proyecciones de temperatura y precipitación (DGA 2017)). Se corrigió el sesgo y se escaló estadísticamente. Solamente se consideró uno de los 4 modelos disponibles para incluir las proyecciones climáticas (CCSM4) que no es el más conservador. Realizar un análisis de sensibilidad de la recarga y del modelo con los 4 modelos de cambio climático y usar el grupo de modelos CMIP6
Mirada funcional	Construir un **sistema de referencia** o **ecosistema objetivo**	En base a una **estimación del estado pre-impacto** establecer un modelo de ecosistema de referencia o encontrar y tomar en cuenta un ecosistema con características similares al del bofedal de Lagunillas pero que no haya sido intervenido (si existe), con un plan de monitoreo sistemático de variables clave	No se indica cuál es la fecha de referencia en el año 2001 para el estándar de recuperación, y si el nivel esperado de recuperación fue fijado en base a un nivel 2001 observado o simulado (y por qué modelo). Aclarar en los informes de actualización los valores de referencia de 2001.
Metodología y herramientas	Robustecer el **sistema de alerta temprana (SAT)**	Contando con una herramienta de **manejo adaptativo**	Los niveles de descenso máximo del acuífero fijados por CMCC son distintos (inferiores) a los fijados por la RCA (67/2011), por lo que el cálculo del descenso es distinto en los monitoreos y en la RCA. En el caso del sistema de alerta temprana, los niveles de descenso de referencia son más exigentes en la RCA. Según los monitoreos, los niveles de varios pozos están bajo el nivel límite de descenso máximo de la RCA desde 2019. Usar los mismos niveles de referencia en el Plan que los propuestos por la RCA. Cuando los niveles de descenso bajan más allá del máximo fijado por la RCA, se debe reducir a 50% (75L /s) la extracción total de aguas subterráneas y se debe reducir a 30% (45L /s) si el sobrepaso persiste más de 6 meses.

			Poner prioridad al diagnóstico y reemplazo de punteras que no pudieron generar datos entre 2018 y 2022.
Metodología y herramientas	Explicitar el uso de metodologías de identificación e involucramiento de **stakeholders** en el diseño y la implementación de la estrategia de compensación.	Para asegurar una **toma de decisión informada.** El éxito de la restauración depende de la **aceptación** del plan por la autoridad ambiental y la comunidad local (y otros stakeholders eventuales)	No se monitorearon los niveles piezométricos en las punteras del sistema Lacustre Lagunillas entre abril 2018 y febrero 2022 porque la comunidad de Cancosa impidió el paso. El monitoreo se reestableció desde 02.2022 pero solamente en 2 de las 9 punteras. Eso también impidió el monitoreo de evapotranspiración en el humedal de Lagunillas. Dar prioridad a esta actividad y retomar el monitoreo

9 ANEXO 3 -VARIABLES MONITOREADAS HISTÓRICAMENTE EN LAGUNILLAS

Tabla 14. Criterios Climáticos-Hidrológicos y Biológicos del bofedal Lagunillas medidos previo el impacto ambiental hasta la actualidad

Componente	Variable	Descripción	Observación	Registros previos a 1994	Registros actuales	Referencia
Climático/ Hidrológico	pH del agua	El valor debería ser pH 7-8.	En Estudios Ambientales realizados por Universidad Arturo Prat desde el año 1993, 1994 y 1995 registran el pH del agua. En los Informes de Cuenca Lagunillas Agua y Biótico para los Periodos 2006-2021(CMCC, 2006-2021), también se registran estos parámetros.	Desde 1993	Hasta año 2021	Carrasco *et al.,* 1993; 1994; 1995; 2010; 2021; CENIMA, 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2019; 2019; 2020; 2021.
	Calidad del agua	Exposición a elementos tóxicos como As, B, Fe y Al en el agua	En Estudios Ambientales realizados por Universidad Arturo Prat desde el año 1993, 1994 registran calidad de agua y concentración de elementos (Temperatura y química del agua). En los Informes de Cuenca Lagunillas Agua y Biótico para los Periodos 2006-2021(CMCC, 2006-2021), también se registran estos parámetros.	Desde 1993	Hasta año 2021	Carrasco *et al.,* 1993; 1994; 1995; 2010; 2021; CENIMA, 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2019; 2019; 2020; 2021.
	Temperaturas de la superficie del aire y terrestre(°C)	Registros Históricos de temperatura superficial del suelo y aire relacionados (°C)	Scheihing y Tröge (2018) registraron un fenómeno de cambio climático a escala local en la cuenca Lagunillas, esto es debido a una caída del nivel freático por debajo de la profundidad de extinción del potencial de energía evaporativa de ~2 m bgl. Datos obtenidos desde 1984 hasta 2012, mediante imágenes Aster y Landsat.	Desde 1993	Hasta año 2012	Scheihing y Tröger, 2018.
Biológico	*Paisaje*	Actividad Fotosintética	Medición *in situ* de fotosíntesis en especies claves (por ejemplo, *Deyeuxia curvula* y *Oxychloe andina*)	Desde 2008 hasta el 2019 en el bofedal de Lagunillas, se realiza un monitoreo de las condiciones ecofisiológicas de especies claves de la vegetación azonal del sistema. Junto con la realización de las mediciones de fotosíntesis, se registra de manera simultánea los parámetros ambientales como la temperatura del aire (ºC), humedad relativa (%) y radiación fotosintéticamente activa en el ambiente (umol m-2 s-1), los cuales permiten	Desde 2008	Hasta 2019

				identificar las condiciones ambientales predominantes durante el período de mediciones.		
	Índices de vegetación	Análisis de la Vegetación Mediante el uso de Imágenes Satelitales (NDVI)	Para la generación de la serie de tiempo histórica se utilizaron las imágenes de reflectancia superficial disponibles de la misión LANDSAT 5, 7 y 8, entre los años 1985 y 2022. A partir de esas imágenes se construyeron series de tiempo de las variables vigorosidad de vegetación (NDVI) y área de cuerpos de agua (mediante clasificación de índice de agua, NDWI>0), y con ello se calcularon los estadísticos descriptivos de la serie.	Desde 1985	Hasta 2022	FCH, 2022
	Ecosistema	Composición	Composición de Flora en ambientes zonal, transicional y azonal (bofedal)	En Estudios Ambientales realizados por Universidad Arturo Prat (UAP) desde el año 1993 hasta 1995 en Pampa Lagunillas se establece como especie dominante a *Oxychloe andina*, sin embargo, las especies acompañantes son descritas hasta nivel de género. En 1994 UAP realizó la colecta de muestras, pero no se identificaron, y quedaron para la conformación de herbario. En 1995 se registra la composición de la flora y cobertura. En los Informes de Cuenca Lagunillas Agua y Biótico para los Periodos 2006-2021(CMCC, 2006-2021), se presenta una mayor descripción de la vegetación (especies presentes, cobertura relativa y estado fenológico).	Desde 1993	Hasta 2021
	Ecosistema	Composición de artrópodos (Similitud taxonómica, Similitud Biocenótica, Riqueza de especies, índice de Uniformidad)	Estudios Ambientales realizados por Universidad Arturo Prat desde el año 1993 hasta 1995 en Pampa Lagunillas. Estos estudios llegan a nivel de Orden.	Desde 1993	Hasta 2021	Carrasco *et al.,* 1993; 1994; 1995; 2010; 2021; CENIMA, 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2019; 2019; 2020; 2021

	Ecosistema	Composición de Fauna terrestre y acuática (captura)	Estudios Ambientales realizados por Universidad Arturo Prat desde el año 1993 hasta 1995 en Pampa Lagunillas involucran la observación y captura de fauna. Desde 1994, se registra la observación de Aves. En los Informes de Cuenca Lagunillas Agua y Biótico para los Periodos 2006-2021(CMCC, 2006-2021), se presenta una mayor descripción de la Fauna (censos de aves se realizan en puntos de observación, presencia de peces y anfibios	Desde 1993	Hasta 2021	Carrasco et al., 1993; 1994; 1995; 2010; 2021; CENIMA, 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2019; 2019; 2020; 2021.
	Densidad de fitoplancton	Individuos registrados/litro de agua.	En Estudios Ambientales realizados por Universidad Arturo Prat desde el año 1993, 1994 y 1995, se registran la densidad de fitoplancton en el agua y su identificación es a nivel de género.	Desde 1993	Hasta 2021	Carrasco et al., 1993; 1994; 1995; 2010; 2021; CENIMA, 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; 2014; 2015; 2016; 2017; 2019; 2019; 2020; 2021

9.1 COMPONENTES Y VARIABLES ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DEL ECOSISTEMA DE REFERENCIA Y LOS ATRIBUTOS DE COMPENSACIÓN EQUIVALENTE

Tabla 15. Componentes y variables incluidos en la metodología asociada a la caracterización y conservación equivalente de bofedales altoandinos de Chile. Se destacan diferentes componentes de la biodiversidad (*C: Composicional, *E: Estructural y *F: Funcional).

Componente	Variable	Descripción	Modo obtención de datos	Variables objeto de compensación (VOC)	Referencia
Climático e Hidrológico	Fuente de agua	Predominantemente agua subterránea y cierta influencia de arroyos/ríos, derretimiento de nieve	Terreno (muestreo isotópico) y literatura		Squeo et al., 2006; Faber-Langedoen et al., 2008
	Hidroperiodo	Cantidad de agua y disponibilidad estacional, especialmente durante los períodos secos	Terreno, Base de Datos		Squeo et al., 2006; Faber-Langedoen et al., 2008
	Posición del nivel freático	Nivel del flujo superficial, volumen, velocidad y caudal del agua	Base de Datos, satelital		Squeo et al., 2006; Faber-Langedoen et al., 2009; SEA, 2022
	pH del agua	Típicamente pH 7-8	Terreno, Base de Datos	X	Squeo et al., 2006
	Calidad del agua	Baja exposición a elementos tóxicos como As, B, Fe y Al en el agua	Terreno, Base de Datos	X	Squeo et al., 2006; Faber-Langedoen et al., 2009; SEA, 2022
	Conectividad hidrológica del bofedal	Evalúa si hay infraestructura u otras evidencias de alteraciones en el curso del agua que debería llegar directamente al bofedal en evaluación	Terreno, Base de Datos, Satelital	X	Faber-Langedoen et al., 2008
	Captación de agua	En el sitio/ aguas arriba	Terreno, Base de Datos		Faber-Langedoen et al., 2008

Geográfico	Fisiografía	Situado en terreno llano, en fondos de valle inclinados y en cuencas amplias poco profundas	Base de Datos, Satelital		Squeo et al., 2006
	Forma de relieve	Rugosidad del suelo, turberas Centro plano o ligeramente elevado	Base de Datos, Satelital		Squeo et al., 2006
	Composición del suelo	Turba de Juncaceae pobremente descompuesta	Terreno, Base de Datos, Satelital		Squeo et al., 2006
	Condiciones edáficas	disponibilidad de nutrientes (principalmente, N, P, K, Ca y Mg)	Terreno, Base de Datos, Satelital		Squeo et al., 2006
Biológico	Paisaje	Diversidad del paisaje *E	Diversidad del paisaje o coberturas de suelo (índice de Shannon)	Terreno, Base de Datos, Satelital	X
	Paisaje	Diversidad del paisaje *E	Dominancia del paisaje o índice de Equidad	Base de Datos, Satelital	X
	Paisaje	Grado de Fragmentación *E	Número de parches, área media de parches, Desviación estándar de área del parche e índice de esbeltez de parches (relación área-perímetro)	Base de Datos, Satelital	X
	Paisaje	Área del bofedal *E	Área	Terreno, Base de Datos, Satelital	X
	Paisaje	Índice de condición del área buffer *E	Porcentaje de cobertura, extensión y condición del área buffer al bofedal	Terreno, Base de Datos, Satelital	X
	Paisaje	Conectividad del paisaje *E	Índices de conectividad entre bofedales y métricas del paisaje (dimensión	Base de Datos, Satelital	X

			fractal, aislamiento entre parches)		
	Paisaje	Conectividad del paisaje *E	Índice integral de conectividad (conectividad funcional entre parches)	Base de Datos, Satelital	X
	Paisaje	Conectividad del paisaje *E	índice de probabilidad de parche (Tamaño y calidad de parche)	Terreno, Base de Datos, Satelital	
	Ecosistema	Cobertura relativa y Abundancia (%) *C	Cobertura y Abundancia de especies de distintas formas de vida, nativas y exóticas.	Terreno, Base de Datos	
	Ecosistema	Composición *C	Diversidad taxonómica (Riqueza)	Terreno, Base de Datos, Satelital	X
	Ecosistema	Composición *C	Diversidad Filogenética	Terreno, Base de Datos	X
	Ecosistema	Composición *C	Diversidad Funcional	Terreno, Base de Datos, Satelital	X
	Ecosistema	Densidad *C	Biomasa (Acumulación de materia orgánica)	Terreno, Base de Datos, Satelital	
	Ecosistema	Distintividad *C	Distintividad Filogenética	Terreno, Base de Datos	X
	Ecosistema		Distintividad Funcional	Terreno, Satelital	X
	Ecosistema	Irremplazabilidad *C	Endémica del sitio, Distribución restringida o Amplia distribución,	Terreno, Base de Datos	X

	Ecosistema	Vulnerabilidad *C	Presencia de especies clasificadas en las categorías de “en peligro”, “vulnerables, “raras”, “insuficientemente conocidas”	Terreno, Base de Datos	X
	Ecosistema	Cambio en la composición de especies en el bofedal a través del tiempo *C	Estimación de la diversidad beta taxonómica mediante la integración de datos multitemporales satelitales (Diversidad espectral)	Terreno, Base de Datos, Satelital	
	Ecosistema	Conectividad *F	Flujo genético de una o más especies dominantes en bofedales. Que posean características de ingeniero ecosistémico	Terreno, Base de Datos	X
	Ecosistema	Regeneración y reclutamiento *F	Inventario de unidades de vegetación, para obtener estado o condición de la regeneración y reclutamiento de las especies de flora	Terreno, Base de Datos	
	Ecosistema	Condición de la vegetación (sanitaria)	Productividad Primaria Neta (PPN). NDVI, SAVI, EVI, etc.	Satelital	x
	Ecosistema	Ambiente de fauna y habitas críticos *E	Existencia de hábitats para las especies que potencialmente habitan los diferentes entornos reconocibles	Terreno, Base de Datos, Satelital	X