

ESTUDIO DE UN MODELO CONCEPTUAL ECOLÓGICO PARA LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA.

Informe 2: Definición, selección y justificación de componentes principales y/o variables influyentes a considerar en la formulación del Modelo Conceptual Ecológico de la Cuenca del Salar de Atacama

Presentado por:



Elaborado para: Comité de Minería No Metálica y Gobernanza de los Salares de CORFO

Líder de Proyecto Carolina Díaz Pardo

Rev.	Fecha	Emitido para	Preparado	Revisado	Aprobación CORFO
1	05-12-2017	Entregable del Hito 2	Equipo Especialistas	C. Diaz	-
2	29-12-2017	Entregable del Hito 2 (v2)	Equipo Especialistas	C. Diaz	-
3	19-01-2018	Entregable del Hito 2 (v3)	Equipo Especialistas	C. Diaz	M.J.Ruiz-Esquide

Contenido

RESUMEN EJECUTIVO.....	1
1 INTRODUCCION.....	3
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo general.....	5
2.2 Objetivos específicos.....	5
3 AREA DE ESTUDIO	5
4 METODOLOGIA	9
5 RESULTADOS	12
5.1 Componentes bióticos	12
5.2 Componentes abióticos	21
5.3 Procesos que regulan las condiciones tróficas del sistema y cambios de estado	23
5.4 Definición, selección y justificación de las variables forzantes, controladoras y/o de estado, si las hubiere, y su relevancia para el modelo (S.Alvarado)	26
5.5 Definición, selección y justificación de las interacciones (relaciones causa-efectos) y su direccionalidad (emisor-receptor, mutua)	32
6 CONCLUSIONES.....	36
REFERENCIAS.....	37

Índice de tablas

Tabla 3-1: Caudales mensuales del río San Pedro en Cuchabrachi (m3/s).....	6
Tabla 3-2: Caudales mensuales del río Vilama en Vilama (m3/s).....	7
Tabla 5-1: Listado de componentes y subcomponentes bióticos a considerar para el desarrollo del modelo ecológico conceptual de la cuenca del Salar de Atacama.....	13
Tabla 5-2: Clasificación de los sistemas vegetacionales azonales hídricos altoandinos.....	14
Tabla 5-3: Clasificación de los sistemas vegetacionales zonales altoandinos	15
Tabla 5-4: Listado de componentes y subcomponentes bióticos a considerar para el desarrollo del modelo ecológico conceptual del Salar de Atacama.....	21

Tabla 5-5: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C1 de Hidrología27

Tabla 5-6: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C2 de Flora y vegetación. El doble asterisco (**) indica que las variables son comunes para todos los subcomponentes.28

Tabla 5-7: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C3 de Fauna terrestre28

Tabla 5-8: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C4 de Ecosistemas acuáticos. El doble asterisco (**) indica que las variables son comunes para todos los subcomponentes28

Tabla 5-9: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C5 Antrópico30

Tabla 5-10: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C5 Abiótico30

Índice DE FIGURAS

Figura 3-1: Curva de Variación Estacional del Río San Pedro en Cuchabrachi..... 7

Figura 3-2: Curva de variación estacional del río Vilama en Vilama 8

Figura 3-3: Diagrama Ombrotérmico sector norte Salar de Atacama 8

Figura 4-1: Talleres de trabajo de especialistas para modelación participativa10

Figura 4-2: Mapas conceptuales preliminares elaborados en taller de trabajo 11

Figura 5-1: Retroalimentaciones que pueden causar que un estado dominado por la vegetación y un estado turbio sean equilibrios alternativos. El efecto cualitativo de cada ruta en el diagrama se puede calcular multiplicando los signos a lo largo del camino. Esto muestra que tanto el estado vegetado como el turbio se auto-refuerzan. Modificado de Scheffer et al., 1993 24

Figura 5-2: Modelo de compartimento para la componente C1 (Hidrología)31

Figura 5-3: Parte de la matriz de adyacencia del componente C1 (Hidrología) en donde se pueden apreciar interacciones bidireccionales (Y=1 para SC11 x SC21 y SC21 x SC11) e interacción unidireccional (Y=0 para SC31 x SC51 e Y=1 para SC51 x SC31). 32

Figura 5-4: Trama trófica simplificada para el ambiente Puna (Marquet et al., 1998) 34



LISTADO DE ANEXOS

- Anexo A Modelos de compartimento para los distintos componentes
- Anexo B Matrices de adyacencia para cada componente
- Anexo C Variables relevantes a múltiples niveles jerárquicos para los componentes bióticos de acuerdo a la aproximación de Noss 1990

RESUMEN EJECUTIVO

Los humedales andinos sustentan una diversidad biológica única y se caracterizan por un alto nivel de endemismo, tanto de especies animales como vegetales, terrestres y acuáticas. Estos humedales cumplen un conjunto importante de funciones ecosistémicas, entre las que se puede considerar que proveen hábitat y sitios de descanso y alimentación para muchas especies de aves migratorias, proveen hábitat y zonas de reproducción para un gran número de especies, muchas de las cuales se encuentran en categorías de conservación.

1

El presente estudio se enfoca en el desarrollo de un modelo conceptual ecológico para la cuenca del Salar de Atacama, correspondiendo el presente documento al segundo informe de avance, el cual, contempla el análisis crítico de los antecedentes ambientales registrados para la cuenca del Salar de Atacama, en particular de los siguientes elementos del modelo conceptual:

- Definición e identificación de componentes conceptuales del modelo ecológico conceptual del Salar de Atacama.
- Definición e identificación de los subcomponentes que constituyen cada uno de estos componentes
- Definición de las variables relevantes a considerar para describir y caracterizar cada uno de los componentes y subcomponentes del modelo ecológico conceptual del Salar de Atacama.
- Definición de las variables forzantes, controladoras, al igual que de los procesos que gobiernan la dinámica global del ecosistema del Salar de Atacama.
- Definición de las principales interacciones entre componentes y subcomponentes del Salar de Atacama.

Para el cumplimiento de los objetivos descritos, se realizó en primera instancia un trabajo de modelación participativa, donde los integrantes del equipo multidisciplinario de especialistas que está desarrollando el presente proyecto, identificaron los componentes, subcomponentes, variables, procesos e interacciones relevantes para estructurar de manera preliminar un modelo ecológico conceptual del ecosistema de la cuenca del Salar de Atacama.

Tomando como base la literatura especializada revisada para distintos ejemplos de modelos conceptuales, y la información revisada para la cuenca del Salar de atacama, se definieron un conjunto de componentes y sus correspondientes subcomponentes.

Junto con esto se definieron distintos números de variables de estado, forzantes y controladoras para cada componente y sus respectivos subcomponentes. En esta etapa de estudio solo se establecieron las relaciones entre subcomponentes mediante relaciones de tipo causal que se denominó “interacción”.

Los antecedentes disponibles destacan la gran diversidad taxonómica y funcional presente en la cuenca del Salar de Atacama, que contrasta con la ausencia de información detallada de la naturaleza de las interacciones tróficas para cada uno de estos componentes. De igual forma, no se ha caracterizado de manera empírica aspectos esenciales de la biología de muchas de estas especies, incluyendo características como:

- Las funciones de regulación densodependiente intraespecífica, es decir, como son las respuestas de una especie en particular al cambio en su densidad (número de individuos por unidad de área o volumen). Diversos estudios han documentado que la natalidad disminuye y la mortalidad aumenta al incrementarse la densidad poblacional.
- Los parámetros de las funciones de regulación competitiva al interior de gremios o grupos funcionales, es decir, como se regula la competencia entre las especies de un gremio o grupo funcional (e.g. el fitoplancton). Dicha competencia se origina cuando los recursos son limitados.
- Las formas y parámetros de las funciones de respuesta numérica y funcional de presas y depredadores, es decir, que especies predan sobre otras y a que tasa.
- Las funciones que describen la movilidad, migración y dispersión de distintos estados de vida de las especies presentes en el Salar de Atacama. Estas funciones ayudarían a entender de mejor forma como ocurren las especies en los distintos sectores del salar, además de permitir reconocer a las especies con mayor rango de distribución que transitan por fuera de los límites de la cuenca del Salar de Atacama.
- Los patrones de organización comunitarios emergentes a lo largo de los gradientes ambientales más importantes. Estos incluyen la variación en riqueza, diversidad, consumo de energía y biomasa en función de atributos físicos y químicos del paisaje. E.g. *Artemia franciscana* ocurre de manera monoespecífica en una laguna (solo esa especie del zooplancton) cuando se sobrepasan los 90 g/L de salinidad en el agua.

Pese a estas brechas y la heterogeneidad del nivel de conocimiento para las especies y sistemas naturales presentes en el Salar de Atacama, se ha podido generar una estrategia de modelamiento que permite no solo plasmar los componentes e interacciones conocidos, sino avanzar en la identificación e incorporación de aquellos que presentan información parcial o fragmentada. Ello permitirá describir de manera conceptual los principales elementos y componentes del ecosistema del Salar de Atacama.

1 INTRODUCCION

Los humedales son ecosistemas acuáticos que forman parte como subsistemas límnicos de las cuencas hidrográficas. En particular, aquellos humedales que son parte de los ecosistemas de páramo, jalca y puna, son conocidos como humedales andinos y altoandinos, que conforman sistemas con una gran variedad de ambientes, como lagos y lagunas de agua dulce (glaciar, volcánico y tectónico), salares, bofedales y turberas, aguas termales y géiseres social (Ahumada et al., 2011). Los humedales andinos sustentan una diversidad biológica única y se caracterizan por un alto nivel de endemismo, tanto de especies animales como vegetales, terrestres y acuáticas (MMA & Centro de Ecología Aplicada, 2011). Estos humedales cumplen un conjunto importante de funciones ecosistémicas, siendo de particular interés para los salares funciones como las siguientes:

- Proveen hábitat y sitios de descanso y alimentación para muchas especies de aves migratorias
- Proveen hábitat y zonas de reproducción para un gran número de especies, muchas de las cuales se encuentran en categorías de conservación relevantes
- Sustentan un conjunto de procesos de almacenamiento y traspaso de energía y biomasa que proveen puntos de alta productividad y riqueza taxonómica

Sumado a estas funciones ecosistémicas, los humedales andinos y alto-andinos proveen un conjunto de servicios ecosistémicos importantes al ser humano, incluyendo el suministro de agua, extracción de recursos mineros, retención de sedimentos y contaminantes, retención y remoción de nutrientes, secuestro de carbono, entre otros atributos especiales, como sustentar una alta biodiversidad, sustentar grandes poblaciones de aves, particularmente de especies migratorias, y también como patrimonio cultural (Carrasco-Lagos et al., 2015). Por todas estas razones los humedales andinos y alto-andinos juegan un rol vital en el desarrollo de las cuencas andinas y de los sistemas hidrográficos que sostienen actividades de importancia económica y social (MMA & Centro de Ecología Aplicada, 2011). La importancia y relevancia de los humedales andinos se pone de relieve si se considera que a escala global estos ecosistemas son escasos y presentan un alto grado de fragilidad. Esto los vuelve ecosistemas particularmente susceptibles tanto a alteraciones naturales como al impacto de actividades realizadas por él ser humano. Desde hace unos años, se ha comprendido su relevancia y han surgido varias iniciativas público-privadas para apoyar la conservación de estos ecosistemas (MMA, 2011). Su alta fragilidad y vulnerabilidad se asocia a causas naturales (como extensas sequías) y antrópicas (como la perturbación en el marco de actividades productivas). De estas últimas las causas más relevantes que han llevado a la degradación de los humedales son: la extracción de agua para usos agrícolas y mineros, la fragmentación de los sistemas acuáticos, los intensos procesos de urbanización, las quemadas, la contaminación y la construcción de grandes obras de infraestructura, además del alto crecimiento de la población humana y una sectorizada y poco integral planificación del desarrollo. Debido a esto, muchos humedales se están perdiendo de manera acelerada, siendo el desconocimiento sobre su dinámica y ecología un punto importante que ha influido sobre este escenario (MMA & Centro de Ecología Aplicada, 2011). Pese a contar con un cierto grado de resiliencia, la degradación de estos ecosistemas acarrea la pérdida no sólo de fuentes esenciales de agua, sino de otros múltiples beneficios incluyendo su potencial para la recreación y el ecoturismo. Por ello es importante su conservación y su uso no debiera ir más allá de los límites del umbral crítico donde su deterioro se hace irreversible (CIREN, 2013). Un umbral crítico es un valor de una o más variables ambientales, que al ser superado desencadena cambios importantes en la estructura y funcionamiento

del sistema. Ejemplos de ello pueden ser la reducción del volumen de agua en un humedal más allá del valor mínimo necesario para sustentar la diversidad de especies y procesos de traspaso y almacenamiento de energía.

Ahora bien, el desarrollo de actividades productivas de gran escala generalmente trae asociado consigo un conjunto de efectos e impactos sobre el entorno natural y social. En un esfuerzo por mitigar o eliminar estos efectos adversos, la institucionalidad y normativa ambiental ha generado procedimientos y reglamentos como la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y el monitoreo ambiental. En ese sentido, un monitoreo ambiental adaptativo se centra en la medición o registro periódico de los recursos y variables ambientales significativos de un sistema ambiental, tanto a lo largo del tiempo como a través del espacio (Lindenmayer & Likens, 2009). Ello con el objetivo de permitir la toma de decisiones ambientales que cautelen la persistencia y bienestar del ecosistema, sus componentes y las comunidades humanas asociadas al mismo. No obstante, para ser eficaz, un programa de monitoreo adaptativo debe presentar algunos elementos clave: i) abordar preguntas bien definidas y precisas, que se especifican antes del inicio del programa de monitoreo; (ii) basarse en un diseño estadístico riguroso; (iii) basarse en un modelo conceptual de cómo un ecosistema podría funcionar, o cómo los componentes estudiados en un programa de monitoreo podrían funcionar (por ejemplo una población, comunidad o formación vegetacional); y por último (iv) ser guiado por el objetivo último de ganar comprensión sobre un ecosistema (Lindenmayer & Likens, 2009).

4

En este caso, el supuesto fundamental es que los humedales, en términos de biodiversidad, son una expresión de los factores físico-químicos que regulan su estructura y funcionamiento. Sin embargo, existe una multiplicidad de variables, que hacen de estos ecosistemas, sistemas muy complejos. Una forma de observar dicha complejidad es mediante la elaboración de un modelo conceptual, el cual, puede ser considerado como una lista de variables de estado y funciones forzantes que son importantes en determinar la estructura, dinámica y funcionamiento de un ecosistema en general (Jørgensen & Fath, 2011). En ese sentido, los modelos o diagramas conceptuales son ampliamente utilizados para sintetizar y comunicar la comprensión de la dinámica del sistema. Un aspecto clave de los modelos conceptuales, es que permiten identificar aquellos procesos y variables ecológicas importantes para determinar la variación y estado del ecosistema. Así, encapsulan las preguntas y componentes que guían el diseño de un plan de monitoreo adaptativo. Además, los modelos conceptuales facilitan la comunicación de interacciones complejas entre especies, recursos y condiciones, y entre estos y los indicadores y estados de los procesos y variables de estado ecológicas. Por ello, la definición de componentes, las variables que los caracterizan, al igual que de los factores y procesos que pueden afectarlos son etapas clave en la elaboración de un modelo ecológico conceptual.

El presente estudio se enfoca en el desarrollo de un modelo conceptual ecológico para la cuenca del Salar de Atacama, correspondiendo el presente documento al segundo informe de avance, el cual, contempla el análisis crítico de los antecedentes ambientales registrados para la cuenca del Salar de Atacama, en particular de los siguientes elementos del modelo conceptual:

- Definición e identificación de componentes conceptuales del modelo ecológico conceptual del Salar de Atacama.
- Definición e identificación de los subcomponentes que constituyen cada uno de estos componentes

- Definición de las variables relevantes a considerar para describir y caracterizar cada uno de los componentes y subcomponentes del modelo ecológico conceptual del Salar de Atacama.
- Definición de las variables forzantes, controladoras, al igual que de los procesos que gobiernan la dinámica global del ecosistema del Salar de Atacama.
- Definición de las principales interacciones entre componentes y subcomponentes del Salar de Atacama.

Tomando estos elementos como base, se procede a construir una descripción inicial del modelo en base a las relaciones que enlazan cada uno de los componentes y subcomponentes, representadas en diagramas de grafos direccionales, así como mediante matrices de diseño que indican la existencia de relaciones de interacción entre componentes y/o subcomponentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Identificar los componentes, variables, procesos e interacciones necesarios para la elaboración de un modelo ecológico conceptual del ecosistema de la cuenca del Salar de Atacama.

2.2 Objetivos específicos

- Seleccionar, definir y justificar los componentes y subcomponentes bióticos influyentes a considerar en la formulación del modelo conceptual ecológico para la cuenca del Salar de Atacama.
- Seleccionar, definir y justificar los componentes y subcomponentes abióticos influyentes a considerar en la formulación del modelo conceptual ecológico para la cuenca del Salar de Atacama.
- Identificar los procesos que regulen las condiciones tróficas del sistema y los cambios de estado para el modelo conceptual ecológico.
- Identificar los componentes, subcomponentes y/o variables forzantes, controladoras y de estado y su relevancia en el modelo conceptual ecológico para la cuenca del Salar de Atacama.
- Identificar las interacciones (relaciones causa-efecto) y su direccionalidad (emisor-receptor, mutua) entre componentes y subcomponentes.

3 AREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la hoya hidrográfica del Salar de Atacama, la cual, corresponde a una cuenca endorreica que se desarrolla en el centro oriente de la II Región de Antofagasta a una altitud de 2.300 m.s.n.m. entre los 22°20' de latitud hasta los 24°10' latitud sur. La cuenca presenta una superficie de 15.620 km², con su mayor longitud en sentido N-S de 210 km y un ancho máximo de 110 km. Se encuentra ubicada entre la Cordillera de los Andes al Este y por la Cordillera de Domeyko al Oeste (Alonso & Risacher, 1995).

El fondo de la cuenca de Atacama está ocupado por el salar propiamente tal, el que posee una superficie de 3.000 km² y corresponde al salar más grande de Chile, en el cual subsisten algunas lagunas remanentes. La extensión húmeda alcanza aproximadamente a 1.500 km², lo que representa un 10% de la superficie total, con una altitud media de 2.400 m.s.n.m. Constituye la base de equilibrio de una profusa red de drenaje, cuyas principales vías de escurrimiento desembocan en la cabecera norte del salar a través de los ríos San Pedro y Vilama (Cade-Idepe, 2004).

El río San Pedro es el principal aporte superficial del Salar de Atacama y es el que sustenta la mayor área regada alrededor del pueblo principal. Igualmente, importantes aportes subterráneos existen por todo el límite oriental y un gran número de pequeños aportes generados en vertientes que caen desde el oriente y también por el extremo sur. El río San Pedro se origina a unos 12 km aguas arriba del pueblo de San Pedro de Atacama de la confluencia de los ríos Grande que viene del noreste y del Salado o Chuschul que proviene del noroeste. El río Grande se origina en la alta cordillera en la confluencia de los ríos Jauna y Putana. El segundo afluente importante del salar corresponde al río Vilama el que nace de la confluencia de los ríos Purifica y Puritana, a 3.370 m de elevación a unos 22 km al norte del pueblo de San Pedro de Atacama (Cade-Idepe, 2004).

En la Tabla 3-1 y Figura 3-1, se muestran los caudales mensuales para distintas probabilidades de excedencia (Pex) del río San Pedro en la estación Cuchabrachi ubicada a 2585 m s.n.m. (período de registro desde 1947 a 2002), donde se puede observar que en esta estación se presenta un régimen pluvial, con sus mayores caudales producto de lluvias estivales e invernales. En años húmedos los mayores caudales ocurren entre enero y febrero, y en menor medida en agosto. En años secos los caudales son más uniformes, presentando leves aumentos en los meses de invierno, entre mayo y julio, y bajos caudales entre octubre y abril (Cade-Idepe, 2004).

Tabla 3-1: Caudales mensuales del río San Pedro en Cuchabrachi (m³/s)

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Pex=5%	0,822	0,822	0,856	0,938	1,025	0,822	0,711	0,828	0,752	1,380	1,019	0,793
Pex=10%	0,773	0,799	0,828	0,893	0,952	0,788	0,689	0,757	0,718	1,147	0,900	0,750
Pex=20%	0,723	0,771	0,795	0,842	0,870	0,749	0,662	0,687	0,680	0,943	0,789	0,705
Pex=50%	0,646	0,718	0,735	0,753	0,733	0,680	0,611	0,594	0,612	0,708	0,649	0,637
Pex=85%	0,578	0,653	0,668	0,655	0,593	0,604	0,548	0,527	0,538	0,571	0,555	0,577
Pex=95%	0,547	0,615	0,632	0,604	0,524	0,563	0,511	0,502	0,498	0,531	0,523	0,550

Pex (%) corresponde a la probabilidad de excedencia. Fuente: Cade-Idepe (2004).

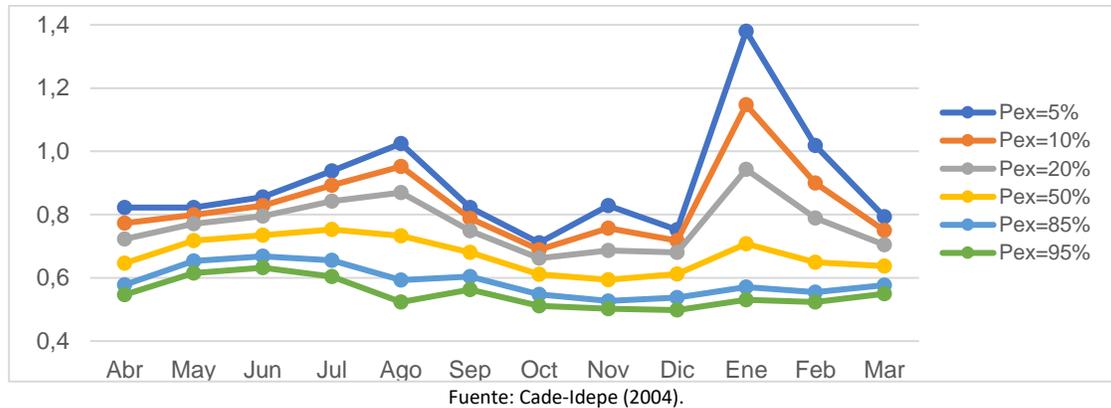


Figura 3-1: Curva de Variación Estacional del Río San Pedro en Cuchabrachi

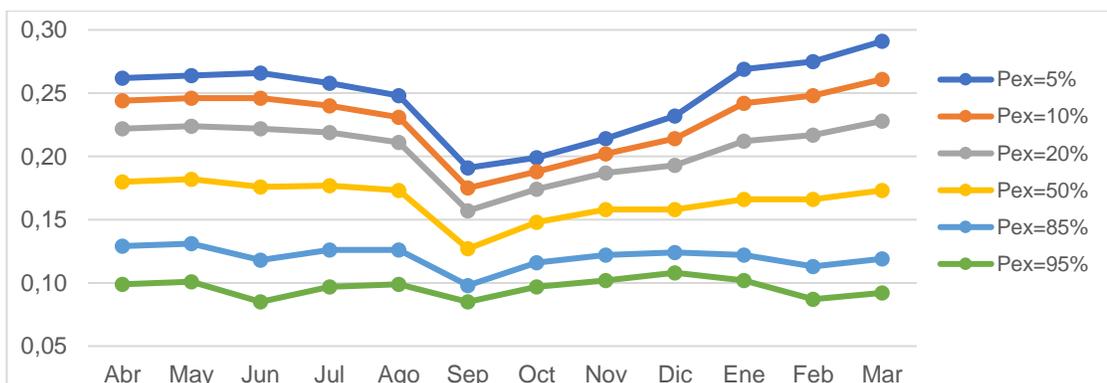
En la Tabla 3-2 y Figura 3-2 se muestran los caudales mensuales para distintas probabilidades de excedencia (Pex) del río Vilama. Esta estación se ubica en la canalización del río Vilama, a 2550 m s.n.m. (período de registro desde 1976 a 2002). Se observa que esta estación muestra un régimen pluvial, con sus mayores caudales en verano e invierno, producto de lluvias estivales e invernales. En años húmedos los mayores caudales se observan entre enero y marzo, y entre abril y julio, mientras que los menores lo hacen entre septiembre y noviembre.

En años secos los caudales son muy uniformes, sin mostrar variaciones de consideración (Cade-Idepe, 2004).

Tabla 3-2: Caudales mensuales del río Vilama en Vilama (m³/s)

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Pex=5%	0,262	0,264	0,266	0,258	0,248	0,191	0,199	0,214	0,232	0,269	0,275	0,291
Pex=10%	0,244	0,246	0,246	0,24	0,231	0,175	0,188	0,202	0,214	0,242	0,248	0,261
Pex=20%	0,222	0,224	0,222	0,219	0,211	0,157	0,174	0,187	0,193	0,212	0,217	0,228
Pex=50%	0,18	0,182	0,176	0,177	0,173	0,127	0,148	0,158	0,158	0,166	0,166	0,173
Pex=85%	0,129	0,131	0,118	0,126	0,126	0,098	0,116	0,122	0,124	0,122	0,113	0,119
Pex=95%	0,099	0,101	0,085	0,097	0,099	0,085	0,097	0,102	0,108	0,102	0,087	0,092

Pex (%) corresponde a la probabilidad de excedencia. Fuente: Cade-Idepe (2004).

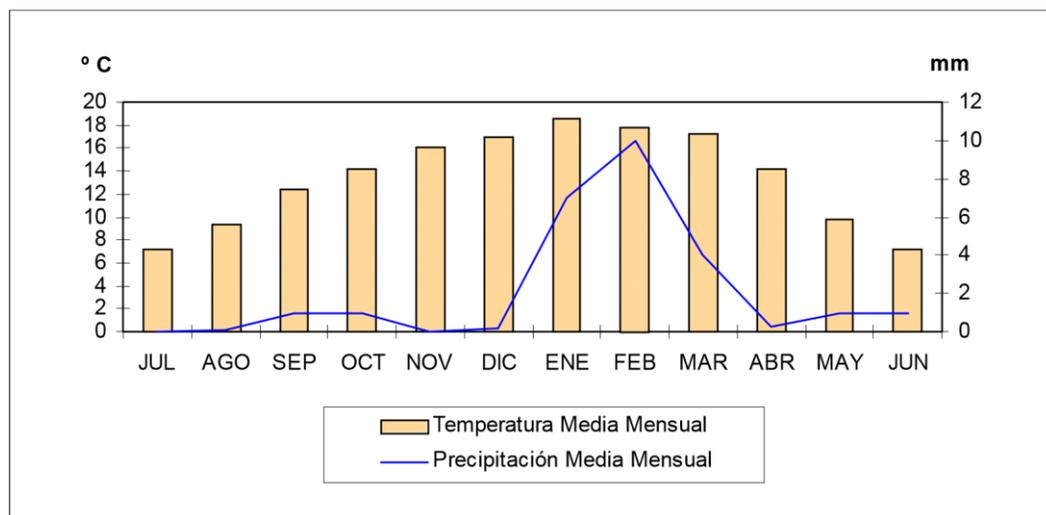


Fuente: Cade-Idepe (2004).

Figura 3-2: Curva de variación estacional del río Vilama en Vilama

Al oriente del salar se desarrolla un plano inclinado de pendiente fuerte, esto genera pequeños escurrimientos de las quebradas Jerez, Talabre, Camar y Peine, que dan vida a algunos oasis, entre ellos los de Toconao, de Socaire y Peine. En el extremo sur del salar, la quebrada de Tarajne y Tulán, mantienen un pequeño oasis llamado Tilomonte, donde prospera el algarrobo. Este árbol, junto al chañar, son los de mayor utilidad y crecen a lo largo de toda la margen oriental del salar. Se han identificado cuatro formaciones vegetacionales en la cuenca: Estepa Alto-Andina, Estepa Arbustiva Pre-Puneña, Desierto de la cuenca superior del río Loa, Desierto del Salar de Atacama.

Los principales aportes al acuífero del Salar de Atacama provienen del extremo este, específicamente, de la infiltración de la precipitación que se produce en el altiplano. Como la cuenca corresponde a un sistema cerrado la descarga se produce por evaporación en el área del salar y en lagunas ubicadas en sus márgenes (DGA, 1986). La cuenca del Salar de Atacama se encuentra bajo un tipo de clima Desértico Marginal de Altura con una temperatura media anual de 13,4°C, con sus máximos valores en enero y febrero, tendencia que se observa también en las precipitaciones. En la Figura 3-3 se muestran los valores de precipitación y temperaturas medias mensuales del sector norte de la cuenca, registrados en la estación San Pedro de Atacama. (Cade-Idepe, 2004).



Fuente: Cade-Idepe (2004).

Figura 3-3: Diagrama Ombrotérmico sector norte Salar de Atacama

4 METODOLOGIA

Para el cumplimiento de los objetivos descritos, se realizó en primera instancia un trabajo de modelación participativa, donde los integrantes del equipo multidisciplinario de especialistas que está desarrollando el presente proyecto, identificaron los componentes, subcomponentes, variables, procesos e interacciones relevantes para estructurar de manera preliminar un modelo ecológico conceptual del ecosistema de la cuenca del Salar de Atacama.

9

Tal ejercicio se llevó a cabo en sesiones de taller, donde un coordinador especialista en modelos conceptuales y matemáticos, orientó al resto de especialistas en identificar los componentes, subcomponentes e interacciones del ecosistema de la cuenca del Salar de Atacama (Figura 4-1). La interrelación y discusión entre los distintos enfoques y participantes de la mesa de trabajo, sumado a técnicas de lluvia de ideas o *brainstorming* (ver Marín et al., 2008), permitió como primera aproximación, elaborar un mapa conceptual con módulos relacionados entre sí (Figura 4-2). Cabe mencionar que la modelación participativa ha sido usada exitosamente en la generación de modelos conceptuales de sistemas socioecológicos complejos (Delgado & Marín, 2005; Heemskerk et al., 2003).

Posterior a este ejercicio y para abordar los objetivos planteados en el presente informe, se seleccionaron, definieron y justificaron cuáles eran los componentes bióticos y abióticos de relevancia a considerar para la formulación del modelo conceptual. Los componentes bióticos incluyen los organismos animales y vegetales que estructuran el ecosistema. Por su parte, los componentes abióticos incluyen tanto las variables hidrológicas e hidrogeológicas forzantes, como las variables físico-químicas presentes en el ecosistema.

Junto con esto, se definieron cuáles son los procesos presentes y de relevancia a considerar para la formulación del modelo conceptual. De este modo se definieron las interacciones entre los componentes seleccionados previamente y se identificó la condición de la relación, indicando la dirección (emisor-receptor o bidireccional) y la dimensión (mayor o menor orden) de la interacción respecto de otras. Esto se realizó como base para el análisis y comprensión del modelo sin la utilización de parámetros numéricos.

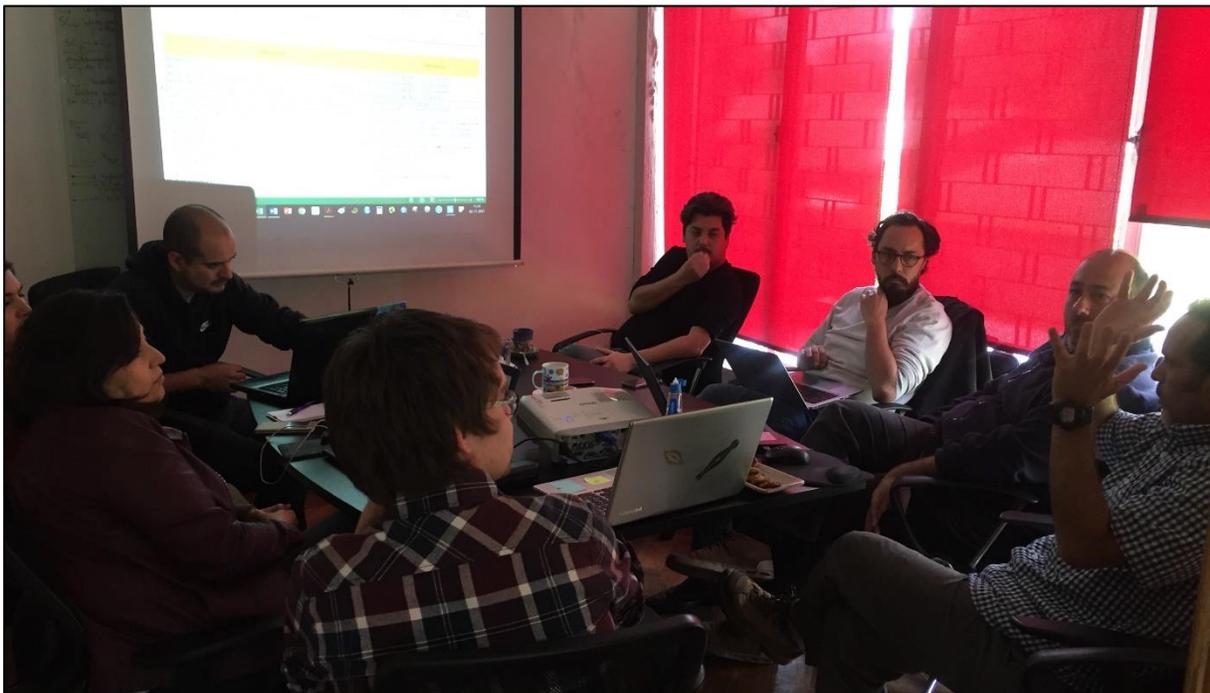


Figura 4-1: Talleres de trabajo de especialistas para modelación participativa

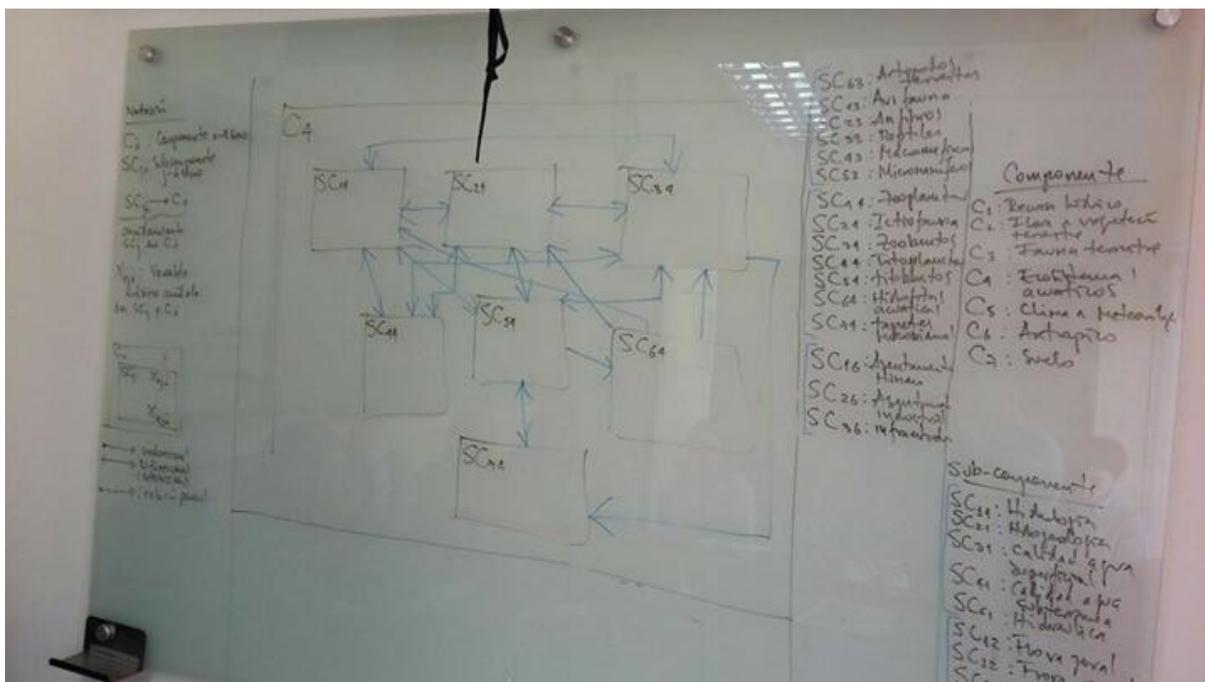
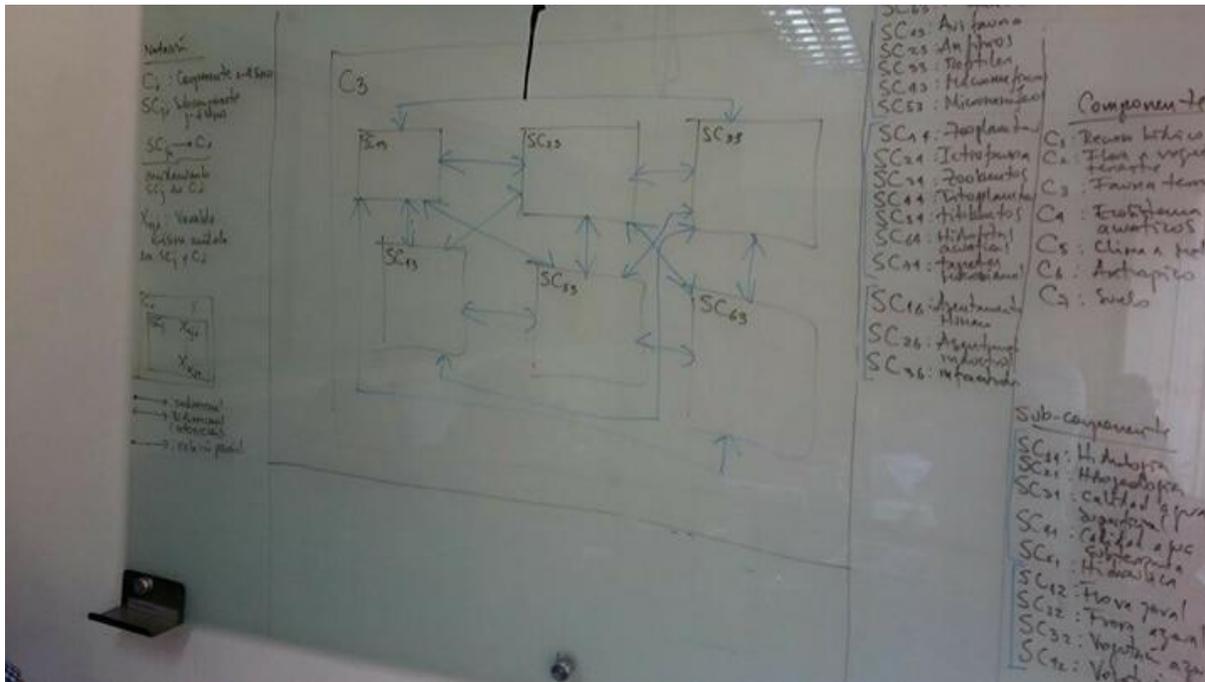


Figura 4-2: Mapas conceptuales preliminares elaborados en taller de trabajo

5 RESULTADOS

Tomando como base la literatura especializada revisada para distintos ejemplos de modelos conceptuales, y la información revisada para la cuenca del Salar de Atacama, se definieron un conjunto de componentes y sus correspondientes subcomponentes.

12

5.1 Componentes bióticos

En esta etapa los componentes y subcomponentes bióticos se mantuvieron a un nivel de agregación intermedio, sin detallarlos al nivel de especie o ensamble funcional¹. Ello permitirá desarrollar la estructura formal global del modelo conceptual mientras se identifican tanto los vacíos de información existentes como la información que se puede inferir desde la literatura especializada y documentos técnicos disponibles. En general, se consideraron elementos bióticos categorizados primero en base a su uso de distintas fases de estado de materia (acuático vs. terrestre) y posteriormente en base a criterios de tipo funcional. Estos últimos consideran tanto el nivel trófico (flora y vegetación vs fauna terrestre o, fitoplancton y fitobentos vs fauna acuática). Finalmente, en muchos casos, se aplicaron criterios de índole taxonómica a niveles superiores de la jerarquía taxonómica para definir subcomponentes. Estos permiten la distinción de organismos dentro de cada componente. Es así como la flora y vegetación se subdivide en Flora y Vegetación Zonal² y Azonal³. Por otra parte la fauna terrestre se subdivide en Avifauna, Anfibios, Reptiles, Macromamíferos y Micromamíferos. En el caso de Ecosistemas Acuáticos, este componente se divide en subcomponentes que incluyen Zooplancton⁴, Ictiofauna⁵, Zoobentos⁶, Fitoplancton⁷, Fitobentos⁸, Hidrofitos Acuáticos⁹ y Tapetes Microbianos¹⁰. Por último, se tomó la decisión de incorporar el efecto del ser humano, considerando un componente relativo al efecto Antrópico, que contempla los subcomponentes

¹ El término *ensamble* hace referencia a un grupo de organismos filogenéticamente relacionado que explota un recurso similar dentro de una comunidad (Fauth et al., 1996). A partir de esta definición se puede esperar que la interacción entre organismos resulte en determinadas interacciones ecológicas propias de las comunidades, como competencia, exclusión, facilitación, entre otras (Ramírez & Gutiérrez-Fonseca, 2016). Así un *ensamble funcional*, corresponde a un grupo de especies de un hábitat relacionadas taxonómicamente, que se relacionan entre sí a través de interacciones biológicas funcionales.

² Flora y Vegetación Zonal. Vegetación dependiente de las condiciones climáticas dominantes (Luebert & Pliscoff, 2006).

³ Flora y Vegetación Azonal. Flora y vegetación que está asociada a factores locales, específicamente a la presencia permanente de humedad o anegamiento constante (Ahumada & Faúndez, 2007).

⁴ Zooplancton. Grupo de organismos microscópicos heterótrofos (componente animal del plancton) que se encuentran suspendidos en la columna de agua, se desplazan con movilidad limitada y viven allí parte o la totalidad de su ciclo de vida (Wetzel, 2001)

⁵ Ictiofauna o fauna íctica. Corresponde a las especies de peces presentes en un lugar.

⁶ Zoobentos. Corresponde a la fauna de invertebrados que habita sobre los sustratos sumergidos o fondo de los sistemas acuáticos durante todo su ciclo de vida o parte de éstos (Alba-Tercedor et al., 2005).

⁷ Fitoplancton. Comunidad de microorganismos, en su mayoría fotosintéticos (microalgas, flagelados heterótrofos y otros grupos organismos sin clorofila) que viven suspendidos en la columna de agua (Wetzel, 2001).

⁸ Fitobentos. Corresponde al complejo de comunidades algológicas que viven asociadas a un sustrato del fondo de los cuerpos de aguas (Parra & Bicudo, 1996).

⁹ Hidrofitos Acuáticos. Corresponde a las plantas acuáticas o flora hidrófila que crece en humedales, especialmente dulceacuícolas, conformando el eslabón inicial de varias cadenas tróficas y sirviendo de lugar de refugio, alimentación y anidamiento de numerosos animales, especialmente aves (CONAMA, 2008).

¹⁰ Tapetes Microbianos. Comunidades bentónicas estratificadas de microorganismos que se desarrollan en la interfase entre el agua y sustratos sólidos. Estos requieren de un basamento donde establecerse, ya que se constituyen por la unión de los microorganismos a las partículas salinas y de sedimentos clásticos (Demergasso et al., 2003).

relacionados a estructuras y actividades como son Asentamiento humanos, Asentamientos Industriales e Infraestructura.

En la Tabla 5-1 se resumen los componentes y subcomponentes bióticos definidos en esta etapa de desarrollo del modelo ecológico conceptual de la cuenca del Salar de Atacama. Los componentes y subcomponentes fueron organizados por los especialistas sin seguir un criterio particular. La nomenclatura a utilizar para representar los componentes es C_j , donde el índice $j=1..k$ representa los sucesivos componentes hasta llegar al k -ésimo componente. Dentro de cada componente se definieron grandes subcomponentes, los que se representan mediante la nomenclatura SC_{ij} , que representa el subcomponente i del componente j . Así el índice $i=1..n_j$ recorre todos los subcomponentes del componente j .

Tabla 5-1: Listado de componentes y subcomponentes bióticos a considerar para el desarrollo del modelo ecológico conceptual de la cuenca del Salar de Atacama

C2 Flora y Vegetación		C3 Fauna Terrestre		C4 Ecosistemas Acuáticos		C5 Antrópico	
SC12	Flora Zonal	SC13	Avifauna	SC14	Zooplancton	SC15	Asentamiento humano
SC22	Flora Azonal	SC23	Anfibios	SC24	Ictiofauna	SC25	Asentamiento Industrial
SC32	Vegetación Zonal	SC33	Reptiles	SC34	Zoobentos	SC35	Infraestructura
SC42	Vegetación Azonal	SC43	Macro mamíferos	SC44	Fitoplancton		
		SC53	Micro mamíferos	SC54	Fitobentos		
				SC64	Hidrofitos Acuáticas		
				SC74	Tapetes microbianos		

Fuente: Elaboración Propia

Con respecto al componente flora y vegetación, podemos determinar cómo subcomponentes fundamentales, la vegetación azonal y zonal. Para todos los efectos entenderemos como vegetación azonal a aquella vegetación dependientes de condiciones edáficas locales, como por ejemplo, suelos saturados, salinos o afloramientos rocosos xeromórficos, independiente del clima regional (Luebert & Plissock, 2006), en el caso de la cuenca del Salar de Atacama, corresponden a sistemas ecológicos correlacionados con un aporte hídrico permanente y constante durante la temporada de crecimiento (fines de primavera, verano e inicios de otoño) y que se caracterizan por su presencia en ambientes normalmente árido-fríos, en el caso chileno asociados a la cordillera de los Andes, y solo puntualmente a la cordillera de la Costa, en donde en medio de matrices arbustivas o herbáceas de escaso o bajo cubrimiento (inferiores a 50 % normalmente) y baja estratificación (habitualmente inferiores a 1 m) aparecen resaltando con su mayor actividad vegetativa y sus mayores cubrimientos (normalmente sobre el 50 %), por ende sistemas de mayor productividad en las áreas en las cuales se ubican, no obstante su menor superficie, constituyéndose en elementos funcionales de alta significación para los ecosistemas relacionados (Ahumada & Faúndez, 2009).

Alfaro & Faundez (2010) definen 10 tipos de sistemas vegetacionales azonales hídricos altoandinos (Tabla 5-2) de los cuales solo 4 se reconocen en el área de estudio, estos son:

- **Bofedal:** corresponde a aquellas formaciones vegetacionales que presentan un cubrimiento vegetal superior al 75% y sus especies dominantes corresponden a *Oxychloe andina* o *Zameioscirpus atacamesis* – *Deyeuxia curvula*. Se encuentran preferentemente en los márgenes o bordes de cuerpos o cursos de agua superficial.
- **Vega salina:** todas aquellas formaciones vegetacionales que presentan como especie dominante a *Carex misera*, en donde la estratificación vertical muestra una altura de la formación que no supera los 10 centímetros con un cubrimiento entre el 10 y 90 por ciento de la superficie.
- **Pajonal salino:** lo constituyen aquellas formaciones vegetacionales compuestas principalmente por especies de gramíneas cespitosas perennes entre las que destacan *Festuca deserticota*, *Festuca nardifolia* y *Deyeuxia curvula*, entre las especies que marcan la fisonomía de las distintas formaciones.
- **Vega:** una estrata herbácea de altura media (< a 100 cm) y cubrimientos de tipo claro a poco denso (cerca al 50%). Las especies de mayor relevancia que componen ésta estrata corresponden a *Juncus balticus*, *Bolboschoenus maritimus*. En aquellas vegas con inundaciones de tipo temporal, es posible encontrar formaciones de *Tessaria absinthioides*, especie de carácter ruderal. La estrata acompañante presenta una altura promedio de 25 cm y cubrimientos de tipo muy claro, compuesta principalmente por especies del género *Distichlis*.

En la Tabla 5-2 se presenta la propuesta de Alfaro & Faúndez (2010) para la clasificación de sistemas vegetacionales azonales hídricos altoandinos. Se detalla tanto el tipo de humedal, su característica principal, si es o no salino, así como también su aporte hídrico y la arquitectura de crecimiento de su vegetación dominante

Tabla 5-2: Clasificación de los sistemas vegetacionales azonales hídricos altoandinos

Tipo de Humedal	Característica	Salinidad	Aporte Hídrico	Arquitectura de Crecimiento
Bofedal	Altoandinos: Superior a los 3500 m	No salino: Afloramientos salinos < a 5%	Saturación de sustrato permanente	Crecimiento de especies no cespitoso, en cojín. Pastos bajos de crecimiento muy compacto.
		Salino: Afloramientos salinos > a 5%	Saturación de sustrato permanente.	
Pajonal Hídrico	Altoandinos: Superior a los 3500 m	No salino: Afloramientos salinos < a 30%	Saturación de sustrato en época estival.	Especies con crecimiento cespitoso, formando champas con alturas de crecimiento mayores a 40 cm.
		Salino: Afloramientos salinos > a 30	Saturación de sustrato en época estival.	

Tipo de Humedal	Característica	Salinidad	Aporte Hídrico	Arquitectura de Crecimiento
Vega	Baja y mediana altitud: bajo los 3500 m	No salino: Afloramientos salinos < a 20%	Contenido de agua del sustrato al menos en capacidad de campo en época estival.	Especies rizomatosas, formando un césped corto con alturas inferiores a los 40 cm.
		Salino: Afloramientos salinos > a 20%	Contenido de agua del sustrato bajo o completamente saturado.	
	Altoandinas: Superior a los 3500 m	No salino: Afloramientos salinos < a 20%	Contenido de agua del sustrato al menos en capacidad de campo en época estival.	
		Salino: Afloramientos salinos > a 20%	Contenido de agua del sustrato bajo o completamente saturado.	
Ripariano	Asociado a las riberas de los cursos de agua de régimen lóxico.	No salino: Afloramientos salinos < a 20%	Curso de agua temporal solo en época estival.	Especies con crecimiento variable, formando estratas con alturas variables.
			Curso de agua permanente.	
		Salino: Afloramientos salinos > a 20%	Curso de agua temporal solo en época estival.	
			Curso de agua permanente.	

Fuente (Alfaro y Faúndez, 2010)

Para todos los efectos, se utilizará tanto la definición como la clasificación de vegetación zonal. Estos autores reconocen 8 pisos de vegetación al interior de los límites de la cuenca Salar de Atacama, estos son:

Tabla 5-3: Clasificación de los sistemas vegetacionales zonales altoandinos

Formación	Clima	Especies	Densidad	Descripción
Matorral bajo	Desértico tropical andino	<i>Atriplex imbricata</i> y <i>Acantholippia deserticola</i> .	Matorral muy abierto	Con o sin suculentas, generalmente dominado por <i>Atriplex imbricata</i> , <i>Acantholippia deserticola</i> y <i>Ambrosia artemisioides</i> , en el que otras especies como <i>Chuquiraga kuscheii</i> , <i>Oreocereus leucotrichus</i> o <i>Stipa frigida</i> pueden ser localmente abundantes. En algunos sectores del norte de la región de Antofagasta es posible observar formaciones de <i>Echinopsis atacamensis</i> asociadas altitudinalmente a la transición entre este piso de vegetación y el inmediatamente superior, Matorral bajo tropical andino de <i>Fabiana denudata</i> y <i>Chuquiraga atacamensis</i> .

Formación	Clima	Especies	Densidad	Descripción
Matorral bajo desértico	tropical interior	<i>Adesmia atacamensis</i> y <i>Cistanthe salsoloides</i>	Matorral muy abierto	Extremadamente xeromórfico en el que dominan <i>Adesmia atacamensis</i> y <i>Cistanthe salsoloides</i> , acompañadas por un elenco variable de especies como <i>Huidobria fruticosa</i> , <i>Dinemandra ericoides</i> y <i>Ephedra breana</i> . Generalmente la vegetación se asocia a situaciones microtopográficas favorables, donde se acumula la escasa humedad. Recibe influencias marginales de lluvias de verano.
Matorral bajo	tropical andino	<i>Adesmia frigida</i> y <i>Stipa frigida</i>	Matorral bajo	Extremadamente xeromórfico, muy pobre en especies, dominado por las plantas en cojín <i>Adesmia frigida</i> y <i>A. echinus</i> y la gramínea <i>Stipa frigida</i> , a las que se agregan ocasionalmente algunas plantas herbáceas o arbustos bajos.
Matorral bajo	tropical andino	<i>Artemisia copa</i> y <i>Stipa frigida</i>	Matorral bajo	Dominado por <i>Adesmia melanthes</i> y <i>Artemisia copa</i> , en el que también participan <i>Stipa frigida</i> , <i>Sisymbrium philippianum</i> , <i>Hoffmanseggia eremophila</i> . En algunos sectores se presentan cactáceas en cojín del género <i>Opuntia</i> (<i>O. atacamensis</i> , <i>O. conoidea</i>) y en otros, una densa estrata de hierbas anuales (e.g. <i>Phacelia pinnatifida</i> , <i>Ipomopsis gossypifera</i>), que emergen después de las lluvias. En las zonas de transición hacia el piso de vegetación inmediatamente inferior en altitud, se mezcla con algunos elementos de ese piso, como <i>Acantholippia deserticola</i> .
Matorral bajo	tropical andino	<i>Fabiana bryoides</i> y <i>Parastrephia quadrangularis</i>	Matorral bajo	Pobre en especies, dominado por los arbustos <i>Parastrephia quadrangularis</i> y <i>Fabiana bryoides</i> y las gramíneas <i>Stipa frigida</i> y <i>Festuca chrysophylla</i> . En su composición destacan algunas otras especies que pueden ser localmente abundantes como <i>Adesmia erinacea</i> , <i>A. melanthes</i> y <i>Senecio xerophilus</i>
Matorral bajo	tropical andino	<i>Fabiana denudata</i> y <i>Chuquiraga atacamensis</i>	Matorral dominado por los arbustos	<i>Fabiana denudata</i> , <i>Chuquiraga atacamensis</i> , <i>Fabiana ramulosa</i> y <i>Baccharis boliviensis</i> . También participan otros arbustos, como <i>Haplopappus rigidus</i> y <i>Ephedra breana</i> y gramíneas como <i>Stipa frigida</i> y <i>S. venusta</i> . En algunos sectores de la zona baja de este piso de vegetación, en la transición con el piso de vegetación Matorral desértico tropical andino de

Formación	Clima	Especies	Densidad	Descripción
				<i>Atriplex imbricata</i> y <i>Acantholippia deserticola</i> , se desarrollan poblaciones de la Cactácea columnar <i>Echinopsis atacamensis</i> .
Matorral bajo	tropical andino	<i>Fabiana squamata</i> y <i>Festuca chrysophylla</i>	Matorral con gramíneas	Dominado por los arbustos <i>Fabiana squamata</i> y <i>Parastrephia quadrangularis</i> y las gramíneas <i>Festuca chrysophylla</i> , <i>Stipa frigida</i> , <i>S. nardoides</i> y <i>S. venusta</i> . También están presentes con abundancias variables los arbustos <i>Fabiana squamata</i> , <i>Adesmia melanthes</i> y <i>Chuquiraga atacamensis</i> , y los cojines <i>Azorella compacta</i> y <i>Pycnophyllum bryoides</i> . En algunos sectores muy localizados de este piso de vegetación se ha reportado la presencia de bosquetes de <i>Polylepis tarapacana</i> , que alcanzan su límite sur de distribución.
Matorral bajo	tropical andino	<i>Mulinum crassifolium</i> y <i>Urbania pappigera</i>	Matorral bajo	Dominado por plantas pulvinadas y gramíneas en mechón, entre las que destacan <i>Mulinum crassifolium</i> , <i>Urbania pappigera</i> , <i>Adesmia caespitosa</i> , <i>Stipa frigida</i> y <i>Deyeuxia crispa</i> , a las que se asocia un elenco diversificado de herbáceas rosuladas, tales como <i>Chaetanthera revoluta</i> , <i>Nototriche auricoma</i> y <i>Perezia atacamensis</i> . En algunos sectores marca el límite altitudinal de la vegetación vascular; en cuya extensión puede mezclarse en una transición difusa con los elementos del Herbazal tropical andino de <i>Chaetanthera sphaeroidalis</i> , el que en algunos casos define un piso de vegetación por encima de éste.
Matorral desértico	tropical interior	<i>Atriplex atacamensis</i> y <i>Tessaria absinthioides</i>	Matorral alto, freatófilo	Dominado por los arbustos <i>Atriplex atacamensis</i> y <i>Tessaria absinthioides</i> y la gramínea <i>Distichlis spicata</i> . Su presencia, asociada a los salares, está determinada por la existencia de una napa freática que proporciona la humedad suficiente para compensar el déficit hídrico provocado por la escasez de las precipitaciones, a pesar de lo cual se ha considerado como una unidad independiente. Ocasionalmente es posible observar la presencia de los árboles espinosos <i>Prosopis alba</i> y <i>Geoffroea decorticans</i> . Debido a estar edáficamente condicionada no es posible reconocer comunidades zonales e intrazonales.

Fuente (Alfaro y Faúndez, 2010)

Respecto a los subcomponentes de fauna terrestres, estas incorporan especies diversas. En el caso de la avifauna destacan un importante número de especies acuáticas incluyendo el flamenco chileno (*Phoenicopterus chilensis*), la parina grande (*Phoenicoparrus andinus*) y la parina chica (*Phoenicoparrus jamesi*); también se encuentran especies como la gaviota andina (*Larus serranus*), la tagua cornuda (*Fulica cornuta*), el playero de Baird (*Calidris fuscicollis*), el caití (*Recurvirostra andina*), el chorlo de la puna (*Charadrius alticola*), el pato jergón grande (*Anas georgica*), el pato juarjual (*Lophonetta specularioides*) y el piuquén (*Chloephaga melanoptera*) (CONAMA, 2008; Villablanca & Ibarra, 2013). Respecto a las aves ás características de hábitat terrestre se pueden mencionar especies como el Surí (*Pterocnemia p. tarapacensis*); el aguilucho (*Buteo polyosoma*); el cóndor (*Vultur gryphus*), la perdiz de la puna (*Tinamotis pentlandii*), el Chirihue verdoso (*Sicalis olivascens*) y la perdiz cordillerana (*Attagis gayi*). En cuanto a los macromamíferos se puede mencionar especies como la vicuña (*Vicugna vicugna*), el guanaco (*Lama guanicoe*), el zorro culpeo y el zorro gris (*Pseudalopex culpaeus* y *Pseudalopex griseus*) y micromamíferos como el Tuco tuco de Atacama (*Ctenomys fulvus*) y la vizcacha (*Lagidium viscacia*). Respecto a los reptiles podemos destacar la lagartija de Fabián (*Liolaemis fabiani*), la lagartija andina (*Liolaemus andinus*) y el Corredor de Pica (*Microlophus theresioides*).

Por otra parte, respecto a los subcomponentes bióticos de los ecosistemas acuáticos se debe poner en contexto que la mayoría de los sistemas altioplánicos presentan un balance hídrico negativo, debido a que las pérdidas por evapotranspiración son mayores a las entradas por precipitación (Aceituno, 1997; Salazar, 1997). Por este motivo estos sistemas presentan una heterogeneidad de gradientes de salinidad y nivel hídrico, que modifican su expresión biológica, presentando cambios en composición, abundancia y diversidad de las especies que los componen.

Las comunidades biológicas, incluidas las microalgas, tienen una alta dependencia de la cantidad y calidad del agua, la cantidad regula la extensión espacial en la cual se pueden desarrollar los distintos componentes biológicos, en tanto que la calidad del agua, estructura la composición y abundancia de las comunidades, producto de los rangos de tolerancia diferenciales de cada especie. Por otra parte, los salares debido a su alta salinidad presentan en términos generales baja diversidad específica (número de especies) y de componentes (Purves et al., 2004).

De este modo, la calidad de los hábitats y la diversidad de la comunidad biológica en estos sistemas acuáticos están altamente relacionados (Márquez-García et al., 2009; Raven et al., 1998). La calidad del hábitat para los sistemas acuáticos está relacionada directamente con la calidad del agua y de los sedimentos, los cuales deben tener las condiciones adecuadas para que posibiliten la vida acuática, con rangos de pH, conductividad y concentración de oxígeno, entre otros, que permitan la sobrevivencia de organismos. Las variables ambientales reconocidas de importancia para determinar el funcionamiento de las comunidades microalgales y otras en el altiplano, son la salinidad (Dorador et al., 2003; Hammer, 1986) y la temperatura (Pardo, 2009), lo que además tiene alta injerencia en el nivel hídrico de los cuerpos de agua.

En términos funcionales la diversidad en los ecosistemas acuáticos, está sustentada en la productividad del bentos¹¹, producida primariamente por los componentes microalgales y las macrófitas (plantas vasculares acuáticas) y secundariamente por el zoobentos. En base a esto, se dan las relaciones de alimentación para tres tipos de organismos productores (tapetes microbianos, microalgas y macrófitas), que elaboran su propio alimento con la energía de la luz convierten las sustancias inorgánicas en orgánicas. Los consumidores se alimentan de los productores o de otros consumidores y saprofitos y descomponedores que se alimentan de materia orgánica muerta. Por lo tanto, se hace indispensable la caracterización física y estimaciones de la calidad del agua para proporcionar una descripción integrada de los factores que están influenciando la condición biológica de los sistemas acuáticos.

En relación a los ensamblajes ficológicos dominantes en los ecosistemas de lagunas se observan la predominancia de diatomeas de los géneros *Amphora*, *Denticula*, *Mastogloia*, *Navicula* y *Nitzschia*, tanto para fitobentos como para fitoplancton y la presencia de numerosas especies endémicas de estos tipos de sistemas ya sea el caso de *Haloroundia speciosa*, *Halamphora atacamae*, *Mastogloia atacamae* entre otras. Respecto de las plantas vasculares acuáticas destacan las hidrófitas ¹²*Ruppia filifolia* y *Zannichelia palustris*; y los helófitos ¹³*Schoenoplectus californicus*, *Sarcocornia fruticosa*, *Distichlis spicata* entre otras.

Como se mencionó, los componentes bióticos en los estos sistemas acuáticos están regulados por la salinidad. Por su parte los productores primarios corresponden a fitoplancton halofílico y/o bacterias que producen el alimento para el zooplancton filtrador (herbívoro) o para las aves acuáticas. El zooplancton, a su vez, puede ser depredado por aves zooplanctívoras. Sumado a esto, algunos copépodos del zooplancton son animales omnívoros que filtran fitoplancton y también predan sobre protozoos y estadíos tempranos de desarrollo de otros zooplancteres, como es el caso de *Boeckella poopuensis* que preda sobre las larvas nauplio de *Artemia franciscana*, lo cual podría ser la causa que ambas especies no coexistan a pesar de que sus rangos de tolerancia a la salinidad lo permiten (De los Ríos-Escalante, 2010). Una característica importante de los cuerpos de agua en Chile, es que se ha observado una mayor riqueza de zooplancteres en salinidades entre 5 g/L y 90 g/L, siendo posible encontrar conviviendo dos especies de copépodos. Sin embargo, sobre 90 g/L en salinidad, solo es posible encontrar presente a *Artemia franciscana*. El amplio gradiente de salinidad encontrado en lagos y lagunas del norte de Chile, permite reconocer una correlación bastante fuerte entre la riqueza de especies y la salinidad. En general, tal correlación es inversa: a mayor valor de salinidad, un menor número de especies está presente (De los Ríos-Escalante, 2010).

Ahora bien, los tapetes microbianos han sido descritos como comunidades bentónicas estratificadas que se desarrollan en la interfase entre el agua y los sustratos sólidos, requieren de un basamento donde establecerse, ya que se constituyen por la unión de los microorganismos a las partículas salinas y sedimentos clásticos. La granulometría de los sedimentos es importante, dado que de esta depende el drenaje, incluyendo la capacidad de retención de agua y la aireación del tapete (Demergasso et al., 2003).

¹¹ Bentos: Comunidad de organismos que vive en el fondo o lecho de un río, lago o mar, desde la marca superior del agua en las orillas hasta lo más profundo.

¹² Las hidrófitas o plantas acuáticas son las que viven en el agua o en suelos inundados.

¹³ Helófitos o hidrófitos emergentes. Son las plantas que viven en las riberas de los espejos de agua y de los ríos, en pajonales y juncales y también en las marismas, donde las crecidas o mareas anegan periódicamente el terreno.

Los tapetes microbianos, en general son estructuras laminadas constituidas por microorganismos (bacterias, archaeas y protistas), formando estructuras que crecen superpuestas en superficie (Farías et al., 2014), el espesor de un tapete oscila entre los 8 y 30 mm (Demergasso et al., 2003). Respecto del tipo de laminación es controlada por factores forzantes como la luz, alta radiación UV, la temperatura, la salinidad, el oxígeno disuelto, la presencia de sulfuros entre otros (Rasuk et al., 2016). Estas laminaciones tienen coloración diferenciada como resultado del desarrollo de bacterias fotosintéticas que contienen distintos pigmentos y, por lo tanto, distintos patrones de utilización de la luz disponible (Demergasso et al., 2003; Rasuk et al., 2016).

Por otra parte, se han observado patrones estacionales asociados a un mayor desarrollo de los tapetes en la época de invierno, cuando el nivel de agua en los salares es mayor, evidenciado por un aumento en la concentración y el contenido de pigmentos y en los niveles de proteínas (Demergasso et al., 2003). El metabolismo de estos organismos es bajo, en condiciones extremas como las salmueras del salar. Los nichos para estos grupos de microbios metabólicamente diferentes, parecen estar espacialmente separados en los ecosistemas lagunares, con gradientes fuertes de oxígeno y sulfuros, a menudo no sobrepuestos (Van Gernerden, 1993).

Se ha documentado en ambientes hipersalinos (salar y lagos), que los ensamblajes bacterianos asociados a los tapetes microbianos estarían dominados por los grupos Bacteroidetes y Gammaproteobacteria, sin embargo el conocimiento de los ensamblajes bacterianos se encuentra ampliamente inexplorados, así como su diversidad constituida además por otros organismos extremófilos (Demergasso et al., 2008; Rasuk et al., 2016)

La presencia de los tapetes está restringida a ambientes extremos que incluyen ambientes marinos costeros y ambientes hipersalinos, vertientes termales y lagos alcalinos. En el sector andino entre los 14 y 27° S, específicamente, en el sector chileno, se encuentran variados ambientes salinos que se extienden desde la zona litoral hasta la alta cordillera, incluyendo cuerpos salinos fosilizados en la parte occidental, hasta otros en plena evolución como sucede en la alta cordillera (Demergasso et al., 2003). Cabe destacar que, en los ambientes hipersalinos y en particular en el salar de Atacama no solo se describen como sistemas laminados a los tapetes microbianos también se describen otras estructuras denominadas microbialitos y evaporitas.

De este modo, los microbialitos corresponden a estructuras órgano-sedimentarias que se forman por la interacción de una gran diversidad de bacterias con el ambiente, los que actúan estabilizando el sedimento (Farías et al., 2014). En cambio, las evaporitas son rocas sedimentarias que se forman por cristalización de sales disueltas en lagos y mares costeros. También se han definido como depósitos de sales precipitadas desde la salmuera vía evaporación solar. Asociados a estos minerales habitan comunidades de microorganismos que se protegen de las condiciones adversas de los salares. La diferencia entre microbialitos y evaporitas radica en que en los microbialitos, existe una inducción por parte de la comunidad microbiana en la precipitación del mineral que generalmente es carbonato de calcio. Mientras que, en los domos de evaporitas, la génesis es principalmente por evaporación y precipitación química de los minerales (Farías et al., 2014).

5.2 Componentes abióticos

Por otra parte, se identificaron aquellos componentes abióticos a considerar en el modelo ecológico conceptual. Para ello se consideraron tanto los ejemplos de modelos conceptuales revisados en la etapa previa como los antecedentes disponibles para el Salar de Atacama. En este sentido se definieron tres grandes componentes, correspondientes al Recurso Hídrico, Factores Abióticos y el efecto Antrópico. Este último se contempló con una doble clasificación dado que el ser humano se caracteriza como especie biológica por contar con un fenotipo extendido muy elaborado y complejo. El concepto de fenotipo extendido fue propuesto por el Biólogo Richard Dawkins, quien argumenta que la información genética de los organismos no solo da cuenta del fenotipo entendido como la morfología, anatomía y fisiología, sino que considera además otros aspectos del entorno del organismo. Es así como la información genética de un organismo tiene efectos sobre el ambiente y su entorno a través de su conducta. Dawkins reconoce tres grandes formas en que se puede reconocer el fenotipo extendido. La primera corresponde a la construcción de estructuras físicas que aumentan la heterogeneidad estructural del paisaje. La segunda corresponde a la manipulación de otros organismos, la que usualmente se ejemplifica a través de organismos como parásitos y parasitoides. Finalmente la tercera categoría de extensiones del fenotipo corresponde a la manipulación a distancia (sin contacto físico) de un organismo, que en el caso del ser humano corresponden a la domesticación de plantas y animales. Dentro de la primera categoría de extensión fenotípica, el ser humano destina grandes cantidades de trabajo biológico y mecánico en la movilización y alteración de estructuras y materiales a lo largo del paisaje. Por ello, desde este punto de vista, las actividades humanas pueden ser consideradas como procesos biológicos que alteran variables y atributos físicos y químicos.

En el caso del Recurso Hídrico se consideraron conjuntos de fenómenos y procesos de meso y macro escala como la Hidrología, Hidrogeología e Hidráulica, al igual que atributos de escala local y regional como la Calidad de Agua Superficial y la Calidad de Agua Subterránea. Finalmente se consideraron como subcomponentes del componente abiótico la Geoquímica y la Topografía del territorio. Todos estos se resumen en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4: Listado de componentes y subcomponentes bióticos a considerar para el desarrollo del modelo ecológico conceptual del Salar de Atacama

C1 Recurso Hídrico		C5 Antrópico		C6 Abiótico	
SC11	Hidrología	SC15	Asentamiento humano	SC16	Geoquímica
SC21	Hidrogeología	SC25	Asentamiento Industrial	SC26	Topografía
SC31	Calidad de Agua Superficial	SC35	Infraestructura		
SC41	Calidad de Agua Subterránea				
SC51	Hidráulica				

Fuente: Elaboración Propia

Referente a la calidad del agua superficial, está dada por las características químicas, físicas y biológicas que tiene un cuerpo de agua, lo cual permite interpretar el estado en el cual se encuentra. Los cuerpos de agua presentan

por lo general una calidad natural, entendida como características propias del sistema, donde la concentración de un compuesto corresponde a la situación original del agua y sus ecosistemas sin intervención antrópica (Cade-Idepe & DGA, 2004). En Chile las aguas superficiales presentan variabilidad espacial con respecto a su composición química presente, principalmente en las aguas del Norte Grande, las cuales se caracterizan por su alto contenido salino, debido a la disolución de sales contenidas en formaciones geológicas que son interceptadas por el cauce estas, poseen altos contenidos de arsénico, asociados al volcanismo cuaternario altiplánico. (MMA, 2011).

Para seleccionar las variables de calidad del agua superficial del Salar de Atacama se analizó la información bibliográfica disponible, donde los resultados de los análisis fisicoquímicos de calidad de aguas son comparados en su mayoría con las normas de calidad asociadas al uso al que están destinadas. Cabe mencionar que las normas chilenas de calidad de agua, toman como referencia, la concentración de las variables monitoreada con el indicador de calidad de agua WQC del inglés *Water Quality Criteria* de la Agencia de Protección Ambiental, EPA (2009), que considera el nivel de concentración de algunos contaminantes, con indicaciones de posibles efectos en el ecosistema en mg/l de cada contaminante.

Al revisar el material bibliográfico disponible para este estudio, se puede observar que la mayoría de los documentos están enfocados en los cursos de aguas superficiales de la cuenca del Salar de Atacama; en los cuales se describe y caracteriza la cuenca a partir de datos en información de calidad de agua. En ella se incluye además la descripción de las zonas aledañas al salar y a la cuenca, los cauces incluidos en el estudio, la cartografía asociada, el sistema físico natural (Clima, geología y volcanismo, hidrogeología, geomorfología, suelos). (GCF Ingenieros Ltda, 2010), (Sociedad Chilena de Litio Ltda (SCL), 2009), (SQM Salar S.A, 2005), (Cade-Idepe & DGA, 2004).

De este estudio se pueden definir las siguientes variables de estado:

- a) Las variables físicas: temperatura, conductividad eléctrica, color o turbidez;
- b) Elementos componentes del agua: pH, alcalinidad, dureza.
- c) Elementos químicos inorgánicos:
 - Oxígeno disuelto
 - Compuestos carbonatados (Carbonatos, Bicarbonatos)
 - Compuestos Nitrogenados (Nitritos, Nitratos, Nitrógeno Total, Nitrógeno Kjendhal)
 - Macro elementos: Sodio, Magnesio, Calcio, Potasio
 - Aniones: Cloruros, Fluoruro, Sulfuro, Sulfatos
 - Metales Pesados
- d) Elementos químicos orgánicos: fenoles, hidrocarburos clorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos o plaguicidas;
- e) Los componentes o elementos biológicos y microbiológicos: bacterias, coliformes fecales.
- f) Velocidad de la corriente,
- g) Caudal

Cabe mencionar que todas las variables son de igual importancia ya que, están todas se relacionan con las condiciones de calidad propiamente tal y el aumento y disminución de su concentración está sujeta al volumen del

recurso hídrico disponible. Del análisis de documentos se logró evidenciar que en la cuenca existe una alta precipitación y escurrimiento, así como una alta demanda de uso del agua, y una importante evaporación e infiltración que provoca que el volumen resultante, algunas veces sea insuficiente para su autodepuración natural.

5.3 Procesos que regulan las condiciones tróficas del sistema y cambios de estado

23

Mediante el proceso de revisión bibliográfica y la discusión al interior del equipo consultor se pudo identificar el conjunto de componentes y subcomponentes relevantes para la elaboración de un modelo ecológico conceptual del ecosistema del salar de atacama. En este contexto, uno de los aspectos importantes a identificar es el potencial que existan procesos que puedan gobernar o determinar de manera importante las condiciones tróficas del sistema y cambios de estado del mismo. Esto es relevante pues contempla la identificación de aquellos fenómenos de gran escala que permiten definir cambios entre estados estables alternativos.

El estado de un sistema ecológico es la condición actual de este sistema ecológico, considerando tanto la composición de especies en los distintos niveles tróficos, como las características físicas y químicas que lo caracterizan. Sin embargo, se ha reconocido que es posible que un sistema ecológico pueda presentar u ocupar más de un estado para un conjunto dado de condiciones ambientales. En otras palabras, si un sistema ecológico se encuentra actualmente en un estado dado, es reflejo de la historia del sistema y las perturbaciones a las que ha estado expuesto. Si este estado se mantiene en el tiempo, pese a variaciones y cambios ambientales, incluyendo perturbaciones del medio abiótico, se denomina un estado estable. Sin embargo, algunos sistemas ecológicos pueden presentar más de un estado, llamados estados alternativos. Estos estados alternativos son estables cuando se mantienen pese a experimentar pequeñas perturbaciones adicionales.

Existen distintos ejemplos que han sido catalogados como evidencia de *estados alternativos estables* (EAS) (ver Beisner et al., 2003; Folke et al., 2004; Knowlton, 2004, para revisiones), incluido el colapso de las pesquerías debido a interacciones en la red alimentaria y cosecha (Jackson et al., 2001; Steele, 1998) y el cambio de comunidades sanas de arrecifes de coral a macroalgas (Hughes, 1994) en ambientes marinos. En el Serengeti, hay cambios entre los bosques y las plantas herbáceas regulados por la actividad de los elefantes y sus plagas (Dublin et al., 1990). Otro ejemplo comúnmente estudiado es un cambio entre los estados de agua clara y turbia en estanques y lagos (por ejemplo, (Beisner et al., 2003; Scheffer et al., 1993). Hay un menor número de ejemplos del EAS inducidos experimentalmente, y una de las razones puede ser porque la escala a la que deben ocurrir las alteraciones suele ser demasiado grande para la experimentación (Petraitis & Latham, 1999).

Un ejemplo claro de EAS es aquel de los sistemas lacustres, lagunas y cuerpos de aguas continentales someras, para los que es posible identificar estados alternativos, descritos a grandes rasgos fases de aguas claras y fases de aguas turbias (Scheffer et al., 1993; Van De Koppel et al., 2001). Brevemente, en la fase clara, estos cuerpos de agua pueden presentar un espejo de agua que se caracterice por presentar aguas muy claras, con una gran transparencia y abundante presencia de plantas acuáticas. Como contraste, en una fase turbia, de eutrofización, estos cuerpos de agua pueden presentar aguas muy turbias, con muy baja transparencia, y abundante presencia de sedimentos suspendidos y sólidos suspendidos en la columna de agua, los que usualmente se asocian a una alta concentración de fitoplancton (Scheffer et al., 1993; Van De Koppel et al., 2001). Se ha descubierto que estos estados ecosistémicos fuertemente contrastantes representan atractores alternativos con distintos mecanismos de retroalimentación estabilizadora. En el estado turbio, la carga de sedimento suspendido en la columna de agua

determina niveles bajos de luz bajo el agua, lo que impide o dificulta el desarrollo de vegetación sumergida o presencia de plantas acuáticas sumergidas. La presencia de sedimentos en suspensión se ve facilitada tanto por la presencia de acción hidrodinámica (olas, flujo en el caso de humedales endorreicos), al igual que por la acción de bioturbación causada por peces cuando se alimentan o se desplazan cerca del lecho del lago. Todos estos procesos conllevan una disminución de la transparencia de la columna de agua. La consecuencia proximal de este conjunto de procesos es una cascada de efectos, donde a la ausencia de plantas que puedan servir como refugios, el zooplancton es devorado por peces, llevando sus densidades poblacionales a niveles insuficientes para controlar las floraciones de microalgas (Scheffer et al., 1993; Van De Koppel et al., 2001). Este estado puede continuar a través del tiempo, experimentando una retroalimentación positiva gradual que lleva a estados cada vez más turbios y mayor dominancia de microalgas o fitoplancton.

En estados extremos, las floraciones masivas de microalgas pueden agotar el oxígeno disuelto en el agua, desencadenando eventos de baja concentración de oxígeno. Tales eventos de hipoxia de la columna de agua pueden causar mortandades de peces, los que a su vez al descomponerse retroalimentan la floración o crecimiento poblacional de microalgas. Un punto clave entonces en el proceso de eutrofización de un lago o laguna somera, al igual que de humedales asociados, es la disponibilidad de nutrientes que puedan fertilizar las comunidades de fitoplancton. La siguiente figura resume los procesos principales que pueden determinar el tránsito desde un estado de fase clara a uno de fase turbia.

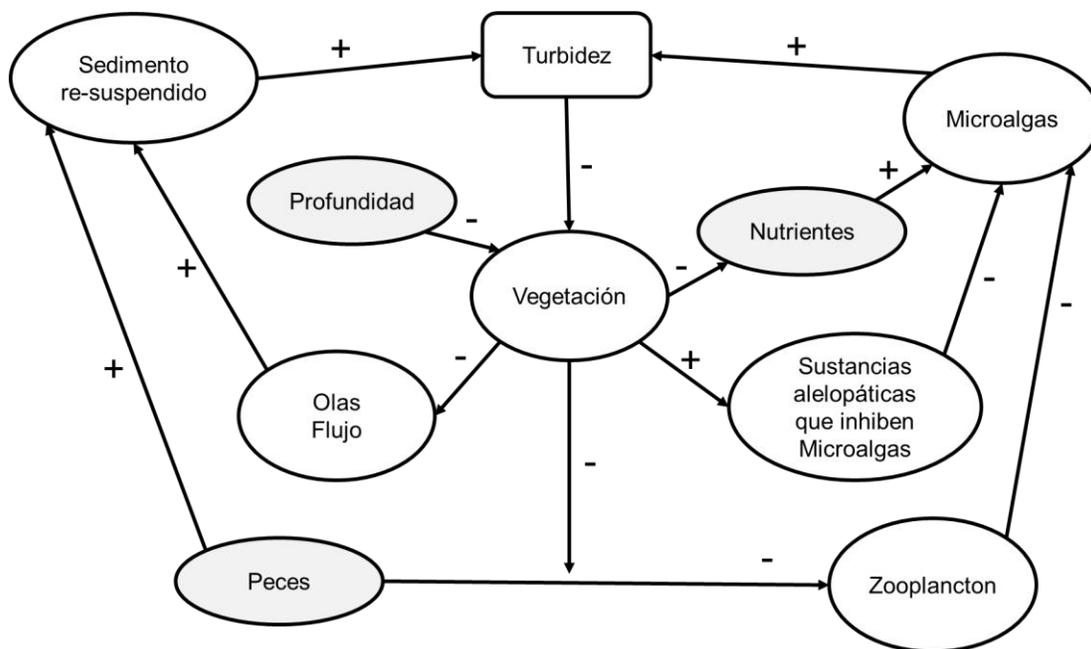


Figura 5-1: Retroalimentaciones que pueden causar que un estado dominado por la vegetación y un estado turbio sean equilibrios alternativos. El efecto cualitativo de cada ruta en el diagrama se puede calcular multiplicando los signos a lo largo del camino. Esto muestra que tanto el estado vegetado como el turbio se auto-refuerzan. Modificado de Scheffer *et al.*, 1993

El marco teórico de estados alternativos estables ha permitido conceptualizar y comprender como la interacción de procesos, interacciones y variables ambientales puede dar cuenta de cambios entre configuraciones ecosistémicas muy distintas.

El grueso de la literatura científica se ha enfocado en sistemas lacustres o en la transición de sistemas terrestres como la sabana africana y las formaciones arbustivas, o el matorral esclerófilo y el bosque nativo en Chile central. Sin embargo, este marco teórico también es relevante y pertinente para sistemas de lagos y humedales salinos. En este sentido, estudios realizados en lagos salinos de Crimea, Rusia, han permitido identificar como una característica principal que determina estados alternativos la estructura de ingreso de energía a los ecosistemas lacustres y límnicos asociados (Samylina et al., 2010; Shadrin, 2014). La península de Crimea, ubicada en el sector norte del Mar Negro, es la península más grande del Mar Negro, abarcando cerca de 26.500 km² y se caracteriza por presentar cerca de 50 grandes lagos hipersalinos, al igual que un gran número de lagos hipersalinos de menor tamaño (Shadrin, 2014). Estos autores han podido identificar diferentes estados alternativos, que se caracterizan por el predominio de diferentes grupos ecofisiológicos de productores primarios fototrófico. Así, estos autores proponen que la dominancia de distintas estrategias de captación de energía y producción primaria pueden definir distintos estados alternativos (Samylina et al., 2010; Shadrin, 2014). Estos autores identificaron los siguientes estados estables:

1. Plancton dominado por Arhea (Halobacteria)
2. Algas – bacterioplancton anóxico
3. Algas – cianobacterias planctónicas
4. Cubierta bentónica de algas verdes
5. Mantos flotantes de algas verdes (Cladophora)
6. Mantos flotantes de bacterias púrpuras,
7. Mantos bentónicos de bacterias púrpuras
8. Biofilm o película de cianobacterias bajo costra de sal
9. Comunidad de angiospermas de *Ruppia*
10. Fondo de biofilm bacteriano.

En este contexto, el conjunto de trabajos realizados en Crimea ha identificado como factor crítico que gobierna estos estados alternativos estables la modificación de la salinidad, como variable forzante principal, con determinados valores de salinidad fijando puntos de transición. Al pasar uno de estos puntos de transición, los investigadores observan que el ecosistema lacustre se transforma, pasando a un estado alternativo distinto. Algo particularmente relevante es que el aumento o disminución de salinidad por sobre o por debajo de un determinado punto de transición de salinidad puede desencadenar cambios hacia sistemas alternativos diferentes. Ello hace evidente que cualquier modificación del régimen hídrico de los salares podría conformarse en una perturbación que aleje al ecosistema de su configuración actual. El que puedan recuperarse o no dependen en gran medida del grado de estabilidad del estado alternativo actual, y de la magnitud de la perturbación. La ruta de retorno, sin embargo, no necesariamente será la sucesión inversa de estadios observados tras la perturbación. Cabe señalar que en el caso de los lagos hipersalinos de la península de Crimea, estos presentan histéresis. Este es un fenómeno donde la ruta de variación en la variable control o forzante desencadena secuencias distintas en la dinámica de cambio del ecosistema. Así, para un mismo valor de las variables controladoras, pueden existir dos configuraciones del ecosistema. Finalmente, en el contexto de los lagos hipersalinos de Crimea, los procesos que pueden modular

la transición de la salinidad incluyen la evaporación al igual que el manejo agrícola en las cuencas de los lagos estudiados, ya que el aporte de escorrentía puede alterar las condiciones de salinidad en estos sistemas. Ello refuerza la noción de que la salinidad y condiciones de equilibrio hídrico pueden jugar un rol preponderante en determinar la estabilidad del ecosistema acuático de los sistemas de lagunas en el Salar de Atacama.

5.4 Definición, selección y justificación de las variables forzantes, controladoras y/o de estado, si las hubiere, y su relevancia para el modelo (S.Alvarado)

26

Para definir los distintos tipos de variables se consideraron los trabajos de (Bilotta & Brazier, 2008; Jones et al., 2011; Soetaert & Herman, 2009). En particular, se consideraron las siguientes definiciones operacionales:

Variables de estado: Son aquellos componentes o variables que nos interesan estudiar. Estas pueden corresponder a los componentes y subcomponentes definidos por los expertos, así como también a variables de naturaleza estocástica que se encuentran anidadas en cada componente y/o subcomponente. Entenderemos como variable de estado a aquella variable “modelable” y que sufre cambios en relación a las variables forzantes y controladoras. Es decir, aquel atributo que puede ser cuantificado y representado en un modelo matemático que da cuenta de su variación temporal, espacial o espacio temporal.

Variables o funciones forzantes: Son aquellos factores externos importantes que regulan el sistema y que impactan en las variables de estado. En este sentido, pueden ser atributos externos cuyas escalas espaciales y temporales características sean de gran magnitud, como el efecto de fenómenos climáticos de gran escala como el El fenómeno del Niño-Oscilación Sur, o bien pueden ser factores externos con una escala y ámbito de acción mucho más específico, como la acción de actividades humanas en áreas muy localizadas del paisaje

Variable controladora: Es aquella variable que da cuenta de manera importante de los cambios en las variables forzantes y de estado, habitualmente es una variable latente, i.e. no es medible directamente, pero si se podría definir en relación a posibles estructuras de relaciones (correlaciones). Ejemplo de ello podría ser el análisis de variables hidrogeológicas en conjunto con variables climáticas y meteorológicas, para determinar eventuales relaciones que puedan dar evidencia de efectos causales.

La Tabla 5-5, Tabla 5-6, Tabla 5-7, Tabla 5-8, Tabla 5-9 y Tabla 5-10 presentan, respectivamente, las variables de estado, forzantes y controladoras para cada componente.

Tabla 5-5: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C1 de Hidrología

Componente	Variables de estado	Variables forzantes	Variables controladoras
C1 Recurso hídrico			
SC11 Hidrología	Precipitación Evaporación	Factor climático	Energía solar Efecto invernadero Circulación atmosférica Circulación oceánica
SC21 Hidrogeología	Nivel piezométrico Permeabilidad Transmisividad Almacenamiento específico	Precipitación Evaporación	Factor climático
SC31 Calidad de agua superficial		Precipitación Evaporación Nivel piezométrico Pendiente Tipo de sustrato Altitud geográfica Temperatura del agua Caudal (Hidrología) Velocidad de la corriente (Hidrología) Profundidad del curso o laguna (Hidrología) Área de espejo de agua (Hidrología) Concentración de Nutrientes (compuestos nitrogenados y fosforados) Concentración de Macroelementos (Ca, Mg, K, Na, etc) Concentración de Metales (Se, Li, etc) Concentración de Oxígeno disuelto Conductividad/Salinidad	Clima: <i>Invierno Altiplánico</i> <i>Oscilación modal (ENSO)</i>
SC41 Calidad de agua subterránea	pH Eh Conductividad Calcio Magnesio Sodio Potasio Carbonato Bicarbonato Cloruro Sulfato Nitrato Temperatura Elementos minoritarios Elementos traza	Precipitación Evaporación Nivel piezométrico Permeabilidad Transmisividad Almacenamiento específico Temperatura Geoquímica	Precipitación Evaporación
SC51 Hidráulica			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-6: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C2 de Flora y vegetación. El doble asterisco () indica que las variables son comunes para todos los subcomponentes.**

Componente C2 Flora y vegetación	Variables de estado	Variables forzantes	Variables controladoras**
SC12 Flora Zonal	Presencia	Clima	Clima : Invierno Altiplánico Oscilación modal como ENSO
SC22 Flora Azonal	Abundancia	Precipitación	
SC32 Vegetación Zonal	Densidad	Temperatura	Interacciones: Intra e interespecíficas
SC42 Vegetación Azonal	Biomasa	Interacciones: Intra e interespecíficas	
	Riqueza de especies		
	Diversidad		
	Consumo de energía		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-7: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C3 de Fauna terrestre

Componente C3 Fauna terrestre	Variables de estado	Variables forzantes	Variables controladoras
SC13 Avifauna	Presencia	Clima	
SC23 Anfibios	Abundancia	Precipitación	
SC33 Reptiles	Densidad	Temperatura	
SC43 Macro mamíferos	Biomasa	Interacciones: Intra e interespecíficas	
SC53 Micro mamíferos	Riqueza de especies		
SC63 Artrópodos terrestres	Diversidad		
	Consumo de energía		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-8: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C4 de Ecosistemas acuáticos. El doble asterisco () indica que las variables son comunes para todos los subcomponentes**

Componente	Variables de estado**	Variables forzantes**	Variables controladoras**
C4 Ecosistemas acuáticos			
SC14 Zooplancton	Presencia	Calidad del agua:	Clima :
SC24 Ictiofauna	Abundancia	Concentración de Nutrientes	Invierno Altiplánico
SC34 Zoobentos	Densidad	(compuestos nitrogenados y compuestos fosforados)	Oscilación modal como ENSO
SC44 Fitoplancton	Biomasa	Concentración de Macroelementos (Ca, Mg, K, Na)	
SC54 Fitobentos	Riqueza de especies	Concentración de Metales (Se, Li, etc)	
SC64 Hidrofítos acuáticas	Diversidad	Concentración de Oxígeno disuelto	
SC74 Tapetes microbianos	Consumo de energía	Temperatura del agua	
		Conductividad/Salinidad	
		Hidrología:	
		Caudal	
		Velocidad de la corriente	
		Profundidad del curso o laguna	
		Recursos hídricos:	
		Evaporación	
		Precipitación	
		Nivel piezométrico	
		Pendiente	
		Tipo de sustrato	
		Altitud geográfica	
		Relaciones tróficas (predación y pastoreo)	
		Interacciones:	
		Competencia	
		Comensalismo	
		Mutualismo	
		Parasitismo	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-9: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C5 Antrópico

Componente C5 Antrópico	VARIABLES DE ESTADO	VARIABLES FORZANTES	VARIABLES CONTROLADORAS
SC15 Asentamiento humano	Actividad agro-pastoril Actividad de extracción	Distancia a salar Ganado domestico Mascotas Densidad	
SC25 Asentamiento Industrial	Actividad de extracción		
SC35 Infraestructura			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-10: Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente C5 Abiótico

Componente C6 Abiótico	VARIABLES DE ESTADO	VARIABLES FORZANTES	VARIABLES CONTROLADORAS
SC16 Geoquímica	Mineralogía	Mineralogía Factor climático	Presión de formación Temperatura de formación Precipitación
SC26 Topografía			

Fuente: Elaboración propia

Así, en las tablas precedentes se muestran los distintos números de variables de estado, forzantes y controladoras para cada componente y sus respectivos subcomponentes. En esta etapa de estudio solo se establecieron las relaciones entre subcomponentes mediante relaciones de tipo causal y que denominaremos “interacción” cuya notación será “SCij x SCij”.

Dichas relaciones se operacionalizaron mediante una variable binaria “Y” que indica la dirección de la relación entre un subcomponente y otro, se asignó un 0 a aquella relación en donde no existe efecto de un componente a otro y 1 cuando existe efecto. A modo ejemplo veamos el componente C1 de Hidrología (Figura 5-2), se aprecia que existen procesos (flechas) que relacionan los subcomponentes entre sí. Se tiene una flecha bidireccional entre SC11 y SC21, esto en la matriz de adyacencia correspondería a Y=1 para las interacciones SC11 x SC21, y SC21 x SC11. Para la interacción entre la SC31 y SC51, se ve una flecha unidireccional que va desde SC51 a SC31, lo que correspondería a Y=0 para SC31 x SC51, e Y=1 para SC51 x SC31 (Figura 5-3).

Para el caso de estudiar la relación de un subcomponente en sí mismo, se tiene que Y=0, ya que en esta etapa todavía no se estudian retroalimentaciones ni retrogresiones al interior de los subcomponentes. En el caso de subcomponentes desagregados al nivel de especie, las retroalimentaciones corresponderían al tipo de denso-dependencia poblacional, y en el caso de fauna social, dinámicas sociales en caso de que las hubiese. Para subcomponentes desagregados al nivel de gremios, ensambles, formaciones vegetacionales o comunidades, las retroalimentaciones corresponderían a una descripción más compleja de la homeostasis o regulación a dichos niveles ecológicos. En ambos casos, la aseveración de retroalimentación o regulación (sea a nivel específico o superior) requiere la definición del atributo o variable de estado en que se conceptualiza la regulación o

retroalimentación, y al menos una hipótesis de trabajo respecto a las principales características de dicho proceso, tanto en términos de los mecanismos biológicos y ecológicos, como de las características cuantitativas. Estas últimas pueden incluir aspectos como las escalas espaciales y temporales a la que se verifica la regulación, eventuales efectos moduladores de estas relaciones, y la evidencia necesaria para aseverar la existencia de regulación. Dada la complejidad de todos estos aspectos, en esta primera instancia no se consideraron interacciones de retroalimentación o retrogresión al interior de cada subcomponente. La factibilidad de incorporar este tipo de efectos se revisará para cada subcomponente tomando como criterio la disponibilidad de antecedentes empíricos que permitan las retroalimentaciones existentes para cada subcomponente.

En Anexo A se presentan los esquemas de los modelos de compartimento para cada componente y en Anexo B las matrices de adyacencia para cada componente. Es importante destacar que la estructura de la matriz de adyacencia se denomina “anidada” ya que permite visualizar y analizar los subcomponentes al interior de cada componente.

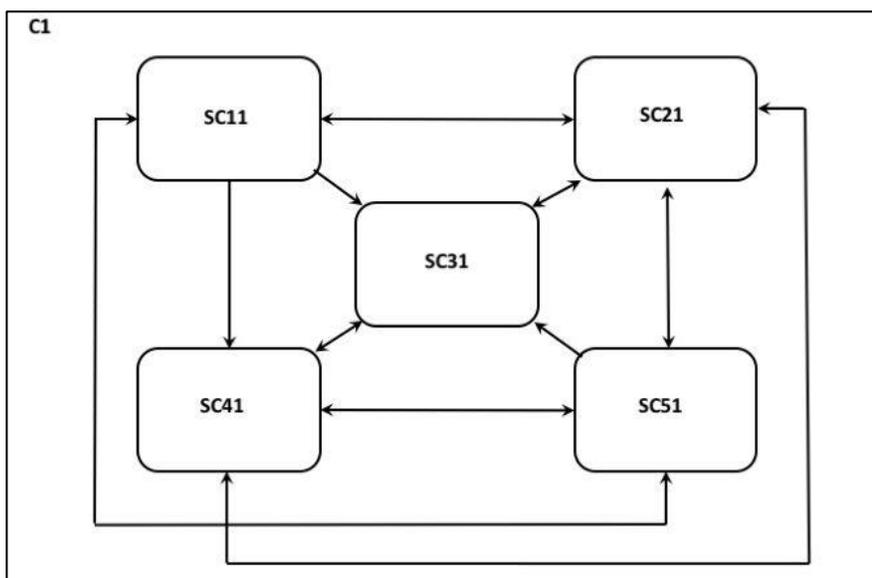


Figura 5-2: Modelo de compartimento para la componente C1 (Hidrología)

Ci	SCij	SCij x SCij	Y
C1	SC11	SC11	0
C1	SC11	SC21	1
C1	SC11	SC31	1
C1	SC11	SC41	1
C1	SC11	SC51	1
C1	SC21	SC11	1
C1	SC21	SC21	0
C1	SC21	SC31	1
C1	SC21	SC41	1
C1	SC21	SC51	1
C1	SC31	SC11	0
C1	SC31	SC21	1
C1	SC31	SC31	0
C1	SC31	SC41	1
C1	SC31	SC51	0
C1	SC41	SC11	0
C1	SC41	SC21	1
C1	SC41	SC31	1
C1	SC41	SC41	0
C1	SC41	SC51	1
C1	SC51	SC11	1
C1	SC51	SC21	1
C1	SC51	SC31	1
C1	SC51	SC41	1
C1	SC51	SC51	0

Figura 5-3: Parte de la matriz de adyacencia del componente C1 (Hidrología) en donde se pueden apreciar interacciones bidireccionales (Y=1 para SC11 x SC21 y SC21 x SC11) e interacción unidireccional (Y=0 para SC31 x SC51 e Y=1 para SC51 x SC31).

5.5 Definición, selección y justificación de las interacciones (relaciones causa-efectos) y su direccionalidad (emisor-receptor, mutua)

Respecto a las interacciones entre componentes y subcomponentes del modelo conceptual, cabe señalar que la información ambiental disponible debe ser sometida a análisis detallado para determinar si sustentan o no la existencia de relaciones causales. Ello se debe a que la determinación de causas en cuanto a interacciones ecológicas habitualmente ha sido documentada mediante la aplicación de protocolos experimentales en el marco del método hipotético deductivo. Desde dicha perspectiva, no existe en el sistema de estudio (Salar de Atacama), un programa de estudio que examine experimentalmente las causas y efectos a nivel de interacciones ecológicas. No obstante, y en base al conocimiento ecológico general y particular de los componentes y procesos observados en el Salar de Atacama, es posible identificar las siguientes interacciones entre componentes y subcomponentes:

- Flujo trófico y conexiones a través de la trama trófica
- Movimiento de individuos móviles, tanto dentro del ámbito de hogar como en el contexto de desplazamiento migratorio
- Dispersión de propágulos y semillas. Esto contempla tanto los síndromes de dispersión de semillas (p.ej. dispersión mediada por granívoros o el viento en el caso de plantas), como el transporte por vectores como en el caso de invertebrados, diatomeas y microalgas acuáticas
- Impacto variables bióticas, físicas y químicas sobre componentes bióticos. Esto considera tanto las interacciones causales con recursos como el impacto de condiciones sobre los organismos a nivel poblacional e individual.
- Transporte de material y nutrientes entre distintos componentes abióticos. Estos pueden darse tanto por la acción hidrodinámica y por efecto de la precipitación que dan como resultado el lavado y transporte de materiales como producto de la escorrentía y filtración de agua. Otra fuente de transporte de materiales es la acción eólica en conjunto con la erosión, al igual que el transporte pasivo y activo por parte de organismos, incluyendo al ser Humano.

Adicionalmente a los fenómenos de movimiento o transporte de material, energía y biomasa, el consumo trófico es tradicionalmente uno de los más estudiados en la elaboración de modelos conceptuales ecosistémicos. A continuación, se detallan algunos de los antecedentes disponibles en la literatura.

Las interacciones tróficas corresponden a conexiones en que una especie o un conjunto de especies se alimentan de otra (u otras) especie(s). Ejemplos incluyen el consumo de invertebrados acuáticos por parte de las distintas especies de flamencos en los cuerpos de agua del Salar de Atacama. En este sentido, existe una interacción mutua entre ambos subcomponentes, ya sea que estos se definan de manera agregada o bien desagregando a nivel de las especies que las componen. En este respecto, estudios de realizados en el flamenco andino han documentado un total de 39 especies de diatomeas presentes en la dieta, observándose 34 de ellas en las heces de polluelos y 25 de ellas en las heces de individuos adultos. Las especies más abundantes en ambos fueron *Surirella sella* y *Denticula thermalis*. Las diatomeas observadas en mayor frecuencia en las heces de los polluelos fueron *S. sella*, *D. thermalis*, *Pinnularia sp.* y *Haloroundia speciosa*, mientras que en las heces de adultos fueron *Denticula thermalis*, *Surirella sella*, *Pinnularia sp.* y *Haloroundia speciosa*, observándose ausencia de diferencias estadísticamente significativas en las diatomeas consumidas por los adultos y polluelos. Otras interacciones tróficas que involucran a aves acuáticas corresponden al consumo de semillas por parte de aves. Ahora bien, desde la perspectiva ecológica, existen pocas publicaciones referidas al área de estudios que estudien, describan o analicen interacciones bióticas planta animal, entre ellas podemos mencionar los estudios de Marquet *et al.* (1998), que producto de variadas investigaciones realizadas por el equipo en un periodo de dos años en el Salar de Atacama y áreas adyacentes, identifica al menos tres ambientes: Lomas, Ripariano y Puna. Cada uno de estos ambientes son caracterizados desde la perspectiva biótica y abiótica. Sin embargo, no se abordan los ambientes de laguna y salares por las condiciones extremas particulares que poseen.

Tanto el ambiente Lomas como Ripariano describen las redes tróficas asociadas al cuerpo de agua: borde costero y Río Loa, respectivamente. El ambiente de Puna describe las redes tróficas adyacentes a la costra de sal del Salar, y puede ser de utilidad para la presente investigación (Figura 5-4). Los depredadores tope *P. culpaeus*, *P. megalopterus* y *B. polyosoma*, se alimentan principalmente de la avifauna insectívora y granívora y roedores. Es relevante mencionar que este trabajo es solo descriptivo de la trama trófica; ya que no se cuantifican los flujos entre componentes.

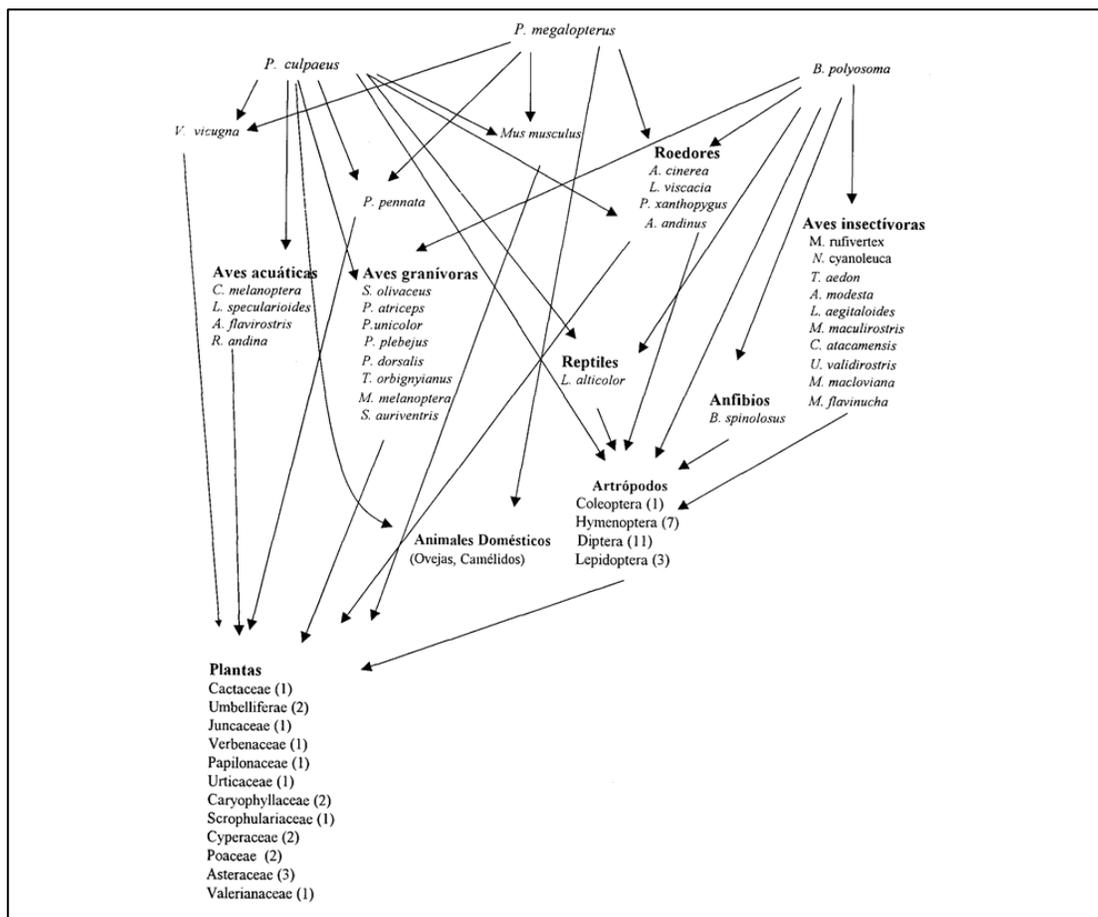


Figura 5-4: Trama trófica simplificada para el ambiente Puna (Marquet et al., 1998)

Otro ejemplo del tipo de información disponible a nivel nacional es el caso de reptiles, como *Microlophus theresioides*, se ha descrito un consumo predominante de artrópodos y vegetales, con una variación estacional en el porcentaje de ambos ítems en la dieta (Rodríguez & Gómez, 1983, citado en Vidal & Labra, 2008).



Respecto a las interacciones tróficas dentro de la costra del salar, la información se restringe a las especies de avifauna y su fuente de alimento principal, y responden a estudios poblacionales en el proceso de desaparición de los primeros. En Crespo & Baessolo (2002) se realiza un análisis de la información disponible del género *Artemia*, *A. franciscana*, habitante de la costra de salar de Atacama, en laguna Cejas (Gajardo et al., 1992; Zúñiga et al., 1994) y laguna Tebenquiche (Zúñiga et al., 1991). En el trabajo se enuncia la relación presa-predador y como vector de dispersión, existente entre *A. franciscana* y las aves migratorias, como *Phoenicopterus sp*, que transportan en su plumaje o su intestino quistes del crustáceo (Colihueque & Gajardo, 1996; Gajardo et al., 1992). En el mismo sentido, existen estudios respecto de las diatomeas que sirven de alimento para las especies de flamencos presentes en los salares del norte de Chile (Díaz & Maidana, 2005). Otros trabajos encontrados describen las asociaciones líquénicas y tapetes microbianos, pero no poseen un componente trófico que permita identificar interacciones entre ellos o en niveles superiores (Demergasso et al., 2003; Hayashida et al., 2017; Scott et al., 2015).

6 CONCLUSIONES

En base a la metodología de trabajo realizada se ha jerarquizado la información disponible para el salar de Atacama, generando una primera clasificación de componentes y subcomponentes.

Los antecedentes disponibles destacan la gran diversidad taxonómica y funcional presente en la cuenca del Salar de Atacama, que contrasta con la ausencia de información detallada de la naturaleza de las interacciones tróficas para cada uno de estos componentes. De igual forma, no se ha caracterizado de manera empírica aspectos esenciales de la biología de muchas de estas especies, incluyendo características como:

36

- Las funciones de regulación densodependiente intraespecífica, es decir, como son las respuestas de una especie en particular al cambio en su densidad (número de individuos por unidad de área o volumen). Diversos estudios han documentado que la natalidad disminuye y la mortalidad aumenta al incrementarse la densidad poblacional.
- Los parámetros de las funciones de regulación competitiva al interior de gremios o grupos funcionales, es decir, como se regula la competencia entre las especies de un gremio o grupo funcional (e.g. el fitoplancton). Dicha competencia se origina cuando los recursos son limitados.
- Las formas y parámetros de las funciones de respuesta numérica y funcional de presas y depredadores, es decir, que especies predan sobre otras y a que tasa.
- Las funciones que describen la movilidad, migración y dispersión de distintos estados de vida de las especies presentes en el Salar de Atacama. Estas funciones ayudarían a entender de mejor forma como ocurren las especies en los distintos sectores del salar, además de permitir reconocer a las especies con mayor rango de distribución que transitan por fuera de los límites de la cuenca del Salar de Atacama.
- Los patrones de organización comunitarios emergentes a lo largo de los gradientes ambientales más importantes. Estos incluyen la variación en riqueza, diversidad, consumo de energía y biomasa en función de atributos físicos y químicos del paisaje. E.g. *Artemia franciscana* ocurre de manera monoespecífica en una laguna (solo esa especie del zooplancton) cuando se sobrepasan los 90 g/L de salinidad en el agua.

Pese a estas brechas y la heterogeneidad del nivel de conocimiento para las especies y sistemas naturales presentes en el Salar de Atacama, se ha podido generar una estrategia de modelamiento que permite no solo plasmar los componentes e interacciones conocidos, sino avanzar en la identificación e incorporación de aquellos que presentan información parcial o fragmentada. Ello permitirá describir de manera conceptual los principales elementos y componentes del ecosistema del Salar de Atacama.

REFERENCIAS

- Aceituno, P. (1997). Aspectos generales del clima en el altiplano sudamericano. In Universidad de Chile (Ed.), *El Altiplano: ciencia y conciencia en los Andes* (pp. 63–69). Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos. Universidad de Chile, Santiago.
- Ahumada, M., Aguirre, F., Contreras, M., & Figueroa, A. (2011). *Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andinos*. Gobierno de Chile. Ministerio del Medio Ambiente; Servicio Agrícola y Ganadero. Departamento de Protección de Recursos Naturales. Unidad de Gestión Ambiental; Dirección General de Aguas. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos.
- Ahumada, M., & Faúndez, L. (2007). *Manual de reconocimiento de especies de flora de las veranadas: Región de Coquimbo*. (Servicio Agrícola y Ganadero & D. de P. de R. N. Renovables, Eds.). Coquimbo.
- Ahumada, M., & Faúndez, L. (2009). *Guía descriptiva de los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres de la ecorregión altiplánica (SVAHT)*. Servicio Agrícola y Ganadero, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.
- Alba-Tercedor, J., Pardo, I., Prat, N., & Pujante, A. (2005). Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la directiva marco del agua en la Confederación Hidrográfica del Ebro, 235.
- Alfaro, V., & Faundez, L. (2010). Caracterización base de vegas y bofedales altoandinos para una gestión sostenible de los recursos hídricos. Primera parte: II Región de Antofagasta. Proyecto Innova Chile. CIREN.
- Alonso, H., & Risacher, F. (1995). Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: Origen de los componentes y balance salino. *Revista Geológica de Chile*, 23(2), 113–122.
- Beisner, B. E., Dent, L. M., & Carpenter, S. R. (2003). Variability of lakes on the landscape: Roles of phosphorus, food webs and dissolved organic carbon. *Ecology*, 84, 1563–1575.
- Beisner, B. E., Haydon, D., & Cuddington, K. L. (2003). Alternative Stable States in Ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1, 376–382.
- Bilotta, S. A., & Brazier, R. E. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and biota. *Water Res*, 42, 2849–2861.
- Cade-Idepe. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca Salar de Atacama*. Cade-Idepe Consultores en Ingeniería. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile.
- Cade-Idepe, & DGA. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Volumen N°1. Informe Final*.
- Carrasco-Lagos, P., Moreno, R., Figueroa, A., Espoz, C., & de la Maza, C. (2015). *Sitios Ramsar de Chile. Seremi del Medio Ambiente Región Metropolitana de Santiago, Universidad Santo Tomás, Universidad de Chile y CONAF*.
- CIREN. (2013). *Caracterización de Humedales Altoandinos para una gestión sustentable de las actividades*

productivas del sector norte del país. Informe Final. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago, Chile.

- Colihueque, N., & Gajardo, G. (1996). Chromosomal analysis in *Artemia* populations from South America. *Cytobios*, 88, 141–148.
- CONAMA. (2008). *Biodiversidad de Chile, Patrimonio y Desafíos*. Comisión Nacional de Medio Ambiente, Gobierno de Chile.
- Crespo, J. E., & Baessolo, L. A. (2002). Biogeografía y taxonomía del género *Artemia* (Crustacea, Anostraca) en Chile: una revisión. *Historia Natural*, 1(4), 17–21.
- De los Ríos-Escalante, P. R. (2010). Crustacean Zooplankton Communities in Chilean Inland Waters. *Crustaceana Monographs*, 12, 109.
- Delgado, L. E., & Marín, V. H. (2005). FES-sistema: un concepto para la incorporación de las sociedades humanas en el análisis medioambiental en Chile. *Revista Ambiente Y Desarrollo*, 21(3), 18–22.
- Demergasso, C., Chong, G., Galleguillos, P., Escudero, L., Martínez-Alonso, M., & Esteve, I. (2003). Tapetes microbianos del Salar de Llamará, norte de Chile. *Revista Chilena De Historia Natural*, 76(3), 485–499. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2003000300012>
- Demergasso, C., Escudero, L., Casamayor, E. O., Chong, G., Balague, V., & Pedros-Alio, C. (2008). Novelty and spatio-temporal heterogeneity in the bacterial diversity of hypersaline Lake Tebenquiche (Salar de Atacama). *Extremophiles*, 12, 491–504. <https://doi.org/10.1007/s00792-008-0153-y>
- DGA. (1986). *Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación en las Regiones I y II*. Dirección General de Aguas. Publicación Interna SDEH 86/4. Trabajo publicado en la *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, Vol. I, N° 2.
- Díaz, C., & Maidana, N. (2005). *Diatomeas de los salares Atacama y Punta Negra, II Región, Chile*. Santiago, Chile: Centro de Ecología Aplicada Ltda.
- Dorador, C., Pardo, R., & Vila, I. (2003). Variaciones temporales de parámetros físicos, químicos y biológicos de un lago de altura: El caso del lago Chungará. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76(1), 15–22. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2003000100002>
- Dublin, H. T., Sinclair, A. R., & McGlade, J. (1990). Elephants and Fire as causes of multiple stable states in the Serengeti-Mara woodlands. *Journal of Animal Ecology*, 59, 1147–1164.
- Farías, M. E., Contreras, M., Rasuk, M. C., Kurth, D., Flores, M. R., Poiré, D. G., ... Visscher, P. T. (2014). Characterization of bacterial diversity associated with microbial mats, gypsum evaporites and carbonate microbialites in thalassic wetlands: Tebenquiche and La Brava, Salar de Atacama, Chile. *Extremophiles*, 18(2), 311–329. <https://doi.org/10.1007/s00792-013-0617-6>
- Fauth, J. E., Bernardo, J., Camara, M., Resetarits, W. J., Van Buskirk, J., & McCollum, S. A. (1996). Simplifying the Jargon of Community Ecology: A Conceptual Approach. *The American Naturalist*. <https://doi.org/10.1086/285850>
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, M. T., Gunderson, L., & Holling, C. S. (2004). Regime

- Shifts, Resilience, and Biodiversity in Ecosystem Management. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 35, 557–581.
- Gajardo, G. M., Wilson, R., & Zúñiga, O. (1992). Report on the occurrence of *Artemia* in a saline deposit of the Chilean Andes (Branchiopoda, Anostraca). *Crustaceana*, 63(2), 169–174.
- GCF Ingenieros Ltda. (2010). *Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamientos en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. II Región Informe final. S.I.T. N° 210.*
- Hammer, U. T. (1986). *Saline Lake Ecosystems of the World*. Monographiae Biologicae, 59. Springer Netherlands.
- Hayashida, G., Schneider, C., Espindola, L., Arias, D., Riquelme, C., Wulff-Zottele, C., ... Rivas, M. (2017). Characterization of a Chlorophyta microalga isolated from a microbial mat in Salar de Atacama (northern Chile) as a potential source of compounds for biotechnological applications. *Phycological Research*, 65, 202–211. <https://doi.org/10.1111/pre.12176>
- Heemskerk, M., Wilson, K., & Pavao-Zuckerman, M. (2003). Conceptual models as tools for communication across disciplines. *Conservation Ecology*, 7(3), 8. <https://doi.org/8>
- Hughes, T. P. (1994). Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*, 265, 1547–1551.
- Jackson, J. B. C., Kirby, M. X., Berger, W. H., Bjorndal, K. A., Botsford, L. W., & More, 14. (2001). Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293, 629–638.
- Jones, N. ., Ross, H., Lynam, T., Perez, P., & Leitch, A. (2011). Mental models: an inter- disciplinary synthesis of theory and methods. *Methods. Ecol*, 16, 1–46.
- Jørgensen, S. E., & Fath, B. (2011). *Fundamentals of Ecological Modelling: Applications in Environmental Management and Research*. Elsevier (4th ed.). Elsevier.
- Knowlton, N. (2004). Multiple “stable” states and the conservation of marine ecosystems. *Progress in Oceanography*, 60, 387–396.
- Lindenmayer, D. B., & Likens, G. E. (2009). Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(9), 482–486.
- Luebert, F., & Plischoff, P. (2006). *Sinopsis Bio- climática y Vegetacional de Chile*. Santiago, Chile.: Editorial Universitaria.
- Marín, V. H., Delgado, L. E., & Bachmann, P. (2008). Conceptual PHES-system models of the Aysén watershed and fjord (Southern Chile): Testing a brainstorming strategy. *Journal of Environmental Management*, 88(4), 1109–1118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.05.012>
- Marquet, P. A., Bozinovic, F., Bradshaw, G. A., Cornelius, C., Gonzalez, H., Gutierrez, J. R., ... Jaksic, F. M. (1998). Los ecosistemas del desierto de Atacama y área andina adyacente en el norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 71, 593–617.
- Márquez-García, M., Vila, I., Hinojosa, L. F., Méndez, M. A., Carvajal, J. L., & Sabando, M. C. (2009). Distribution and seasonal fluctuations in the aquatic biodiversity of the southern Altiplano. *Limnologia*, 39(4), 314–318.

<https://doi.org/10.1016/j.limno.2009.06.007>

- MMA. (2011). Capítulo 8: Recursos Hídricos. In *Informe del Estado del Medio Ambiente* (pp. 322–362).
- MMA, & Centro de Ecología Aplicada. (2011). *Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental*. Ministerio de Medio Ambiente. Santiago, Chile.
- Pardo, R. (2009). *Regulación de la biomasa fitoplanctónica en el lago Chungará. Control de eutroficación mediante pastoreo de copépodos*. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile.
- Parra, O. O., & Bicudo, C. E. . (1996). *Algas de Aguas Continentales: Introducción a la Biología y Sistemática*. (Universidad de Concepción, Ed.).
- Petraitis, P. S., & Latham, R. E. (1999). The importance of scale in testing the origins of alternative community states. *Ecology*, *80*, 429–442.
- Purves, W. K., Sadava, D., Orians, G. H., & Heller, H. C. (2004). *Life: The Science of Biology (7th edn)*. W. H. Freeman & Co.
- Ramírez, A., & Gutiérrez-Fonseca, P. E. (2016). Sobre ensamblajes ecológicos - Respuesta a Monge-Nájera. *Revista de Biología Tropical*, *64*(2), 817–819. <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i2.21232>
- Rasuk, M. C., Fernández, A. B., Kurth, D., Contreras, M., Novoa, F., Poiré, D., & Farías, M. E. (2016). Bacterial Diversity in Microbial Mats and Sediments from the Atacama Desert. *Microbial Ecology*, *71*(1), 44–56. <https://doi.org/10.1007/s00248-015-0649-9>
- Raven, P. J., Boon, P. J., Dawson, F. H., & Ferguson, A. J. D. (1998). Towards an integrated approach to classifying and evaluating rivers in the UK. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *8*, 383–393.
- Salazar, C. (1997). Hidrología del sector altiplánico Chileno. In Universidad de Chile (Ed.), *El Altiplano: ciencia y conciencia en los Andes* (pp. 71–77). Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos. Universidad de Chile, Santiago.
- Samylina, O., Gerasimenko, L. ., & Shadrin, N. (2010). Comparative Characteristic of the Phototroph Communities from the Mineral Lakes of Crimea (Ukraine) and Altai Region (Russia). *International Journal on Algae*, *12*, 142–158.
- Scheffer, M., Hosper, S. H., Meijer, M. L., & Moss, B. (1993). Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology and Evolution*, *8*, 275–279.
- Scott, S., Dorador, C., Oyanedel, J., Tobar, I., Hengst, G., Harrod, C., & Vila, I. (2015). Microbial diversity and trophic components of two high altitude wetlands of the Chilean Altiplano. *Gayana*, *79*(1), 45–56. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382015000100006>
- Shadrin, N. (2014). Alternative States of Saline Lake Ecosystems and Development of Salinology. *Acta Geologica Sinica*, *88*(s1), 434–435.
- Sociedad Chilena de Litio Ltda (SCL). (2009). *Línea de Base EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama. Región de Antofagasta, Chile* (Vol. Capitulo 5).
- Soetaert, K., & Herman, P. M. J. (2009). *A Practical Guide to Ecological Modelling*. Dordrecht: Springer

Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8624-3>

SQM Salar S.A. (2005). *Línea Base “Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama.”*

Steele, J. H. (1998). Regime shifts in marine ecosystems. *Ecological Applications*, 8, S33–S36.

Van De Koppel, J., Herman, P. M. J., Thoolen, P., & Heip, C. H. R. (2001). Do alternate stable states occur in natural ecosystems? Evidence from a tidal flat. *Ecology*, 82, 3449–3461.

Vidal, M. A., & Labra, A. (2008). *Herpetología de Chile*. Santiago, Chile: Science Verlag.

Villablanca, R., & Ibarra, J. (2013). *Estrategia Regional y Plan de Acción para la Conservación y Uso Sustentable de la Diversidad Biológica de la Región de Antofagasta. Diagnóstico y Evaluación (2002-2013)*. Secretaría Regional Ministerial. Región de Antofagasta. Ministerio del Medio Ambiente.

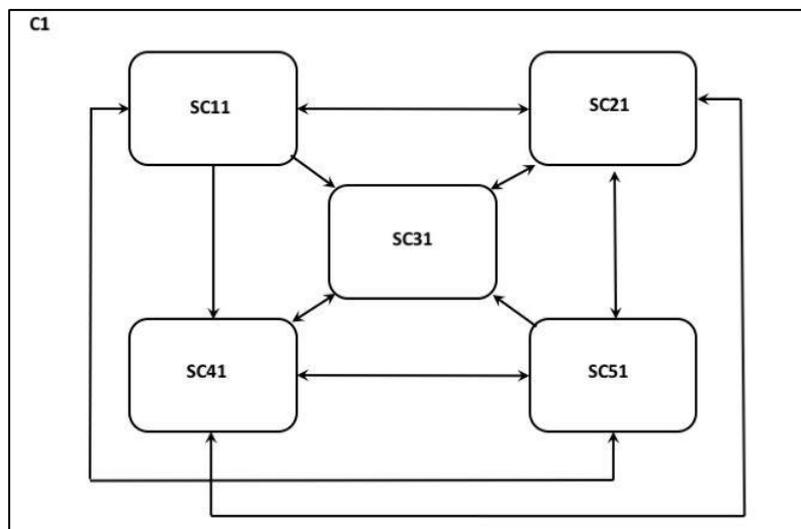
Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems, Third Edition*. Academic Press.

Zúñiga, L., Campos, V., Pinochet, H., & Prado, B. (1991). A limnological reconnaissance of Lake Tebenquiche, Salar de Atacama, Chile. *Hydrobiologia*, 210, 19–24. <https://doi.org/10.1007/BF00014320>

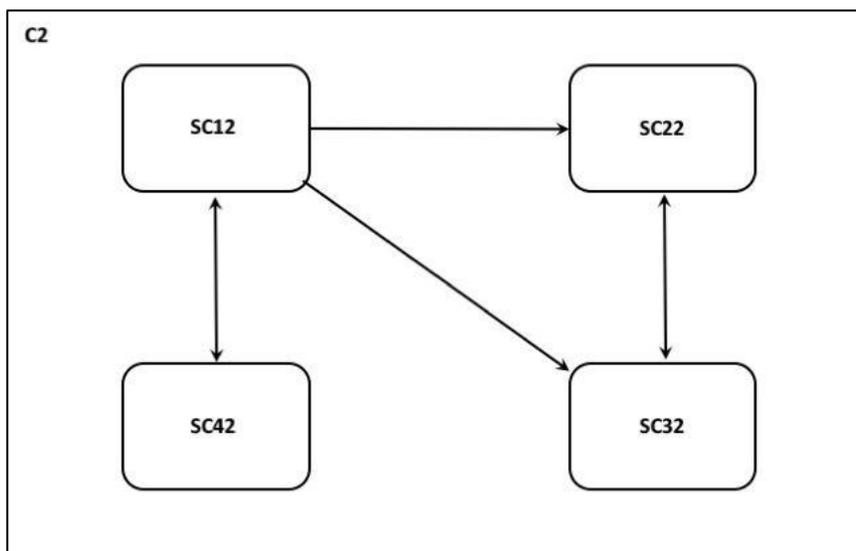
Zúñiga, O., Wilson, R., Amat, F., & Hontoria, F. (1999). Distribution and characterization of Chilean populations of the brine shrimp *Artemia* (Crustacea, Branchiopoda, Anostraca). *International Journal of Salt Lake Research*, 8(1), 23–40. <https://doi.org/10.1023/A:1009056621535>

Zúñiga, O., Wilson, R., Ramos, R., Retamales, E., & Tapia, L. (1994). Ecología de *Artemia franciscana* en la laguna Cejas, Salar de Atacama (Chile). *Estudios Oceanológicos*, 13, 71–84.

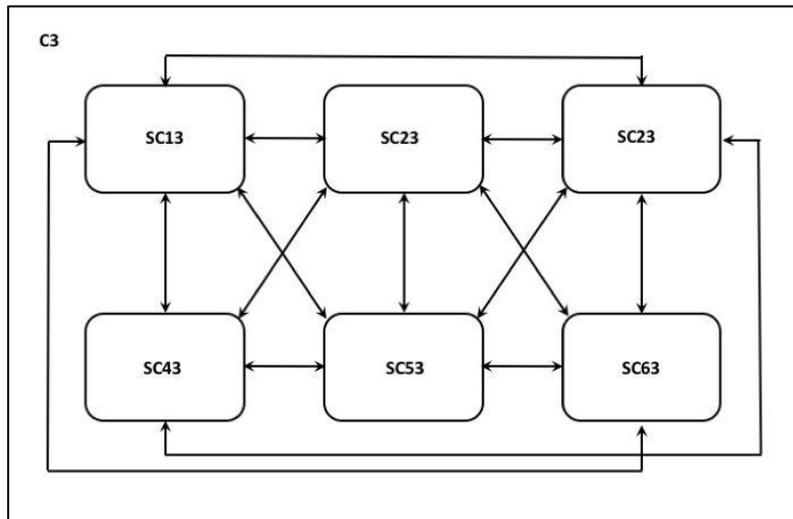
ANEXO A MODELOS DE COMPARTIMENTO PARA LOS DISTINTOS COMPONENTES



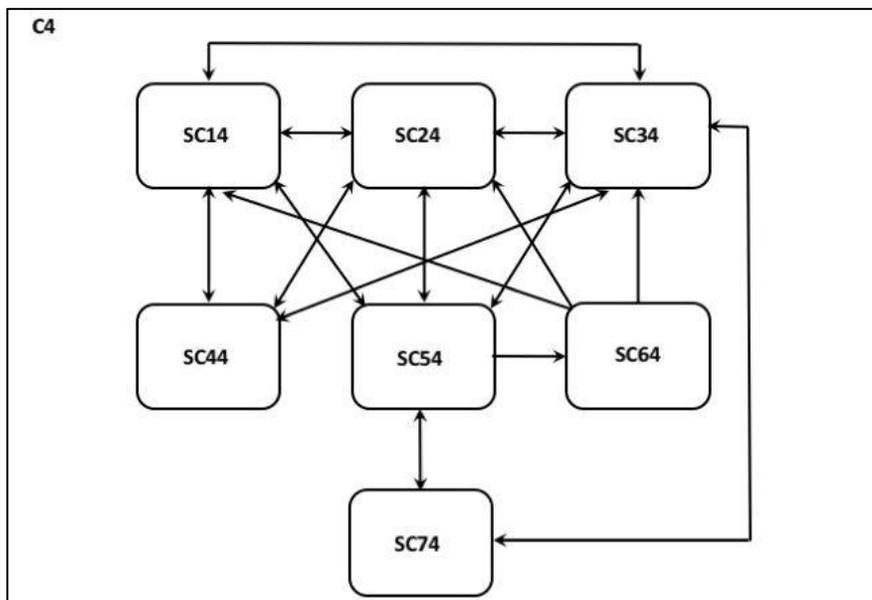
Modelo de compartimento para la componente C1 (Hidrología).



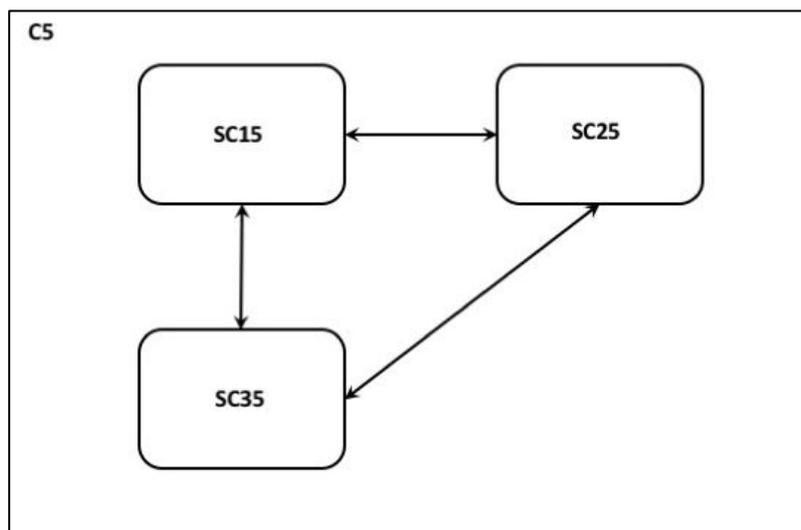
Modelo de compartimento para la componente C2 (Flora y vegetación).



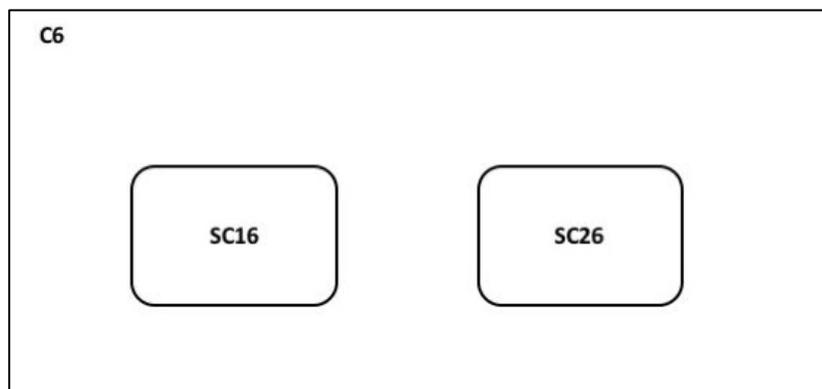
Modelo de compartimento para la componente C3 (Fauna terrestre).



Modelo de compartimento para la componente C4 (Ecosistemas acuáticos)



Modelo de compartimento para la componente C5 (Antrópico).



Modelo de compartimento para la componente C6 (Abiótico).



ANEXO B

MATRICES DE ADYACENCIA PARA CADA COMPONENTE

Ci	SCij	SCij x SCij	Y
C1	SC11	SC11	0
C1	SC11	SC21	1
C1	SC11	SC31	1
C1	SC11	SC41	1
C1	SC11	SC51	1
C1	SC21	SC11	1
C1	SC21	SC21	0
C1	SC21	SC31	1
C1	SC21	SC41	1
C1	SC21	SC51	1
C1	SC31	SC11	0
C1	SC31	SC21	1
C1	SC31	SC31	0
C1	SC31	SC41	1
C1	SC31	SC51	0
C1	SC41	SC11	0
C1	SC41	SC21	1
C1	SC41	SC31	1
C1	SC41	SC41	0
C1	SC41	SC51	1
C1	SC51	SC11	1
C1	SC51	SC21	1
C1	SC51	SC31	1
C1	SC51	SC41	1
C1	SC51	SC51	0

Matriz de adyacencia del componente C1 (Hidrología)

Ci	SCij	SCij x SCij	Y
C2	SC12	SC12	0
C2	SC12	SC22	1
C2	SC12	SC32	1
C2	SC12	SC42	1
C2	SC22	SC12	0
C2	SC22	SC22	0
C2	SC22	SC32	1
C2	SC22	SC42	0
C2	SC32	SC12	0
C2	SC32	SC22	1
C2	SC32	SC32	0
C2	SC32	SC42	0
C2	SC42	SC12	1
C2	SC42	SC22	0
C2	SC42	SC32	0
C2	SC42	SC42	0

Matriz de adyacencia del componente C2 (Flora y vegetación)

Ci	SCij	SCij x SCij	Y
C3	SC13	SC13	0
C3	SC13	SC23	1
C3	SC13	SC33	1
C3	SC13	SC43	1
C3	SC13	SC53	1
C3	SC13	SC63	1
C3	SC23	sa13	1
C3	SC23	SC23	0
C3	SC23	SC33	1
C3	SC23	SC43	1
C3	SC23	SC53	1
C3	SC23	SC63	1
C3	SC33	SC13	1
C3	SC33	SC23	1
C3	SC33	SC33	0
C3	SC33	SC43	1
C3	SC33	SC53	1
C3	SC33	SC63	1
C3	SC43	SC13	1
C3	SC43	SC23	1
C3	SC43	SC33	1
C3	SC43	SC43	0
C3	SC43	SC53	1
C3	SC43	SC63	1
C3	SC53	SC13	1
C3	SC53	SC23	1
C3	SC53	SC33	1
C3	SC53	SC43	1
C3	SC53	SC53	0
C3	SC53	SC63	1
C3	SC63	SC13	1
C3	SC63	SC23	1
C3	SC63	SC33	1
C3	SC63	SC43	1
C3	SC63	SC53	1
C3	SC63	SC63	0

Matriz de adyacencia del componente C3 (Fauna terrestre)

Ci	SCij	SCij x SCij	Y
C4	SC14	SC14	0
C4	SC14	SC24	1
C4	SC14	SC34	1
C4	SC14	SC44	1
C4	SC14	SC54	1
C4	SC14	SC64	0
C4	SC14	SC74	0
C4	SC24	SC14	1
C4	SC24	SC24	0
C4	SC24	SC34	1
C4	SC24	SC44	1
C4	SC24	SC54	1
C4	SC24	SC64	0
C4	SC24	SC74	0
C4	SC34	SC14	1
C4	SC34	SC24	1
C4	SC34	SC34	0
C4	SC34	SC44	1
C4	SC34	SC54	1
C4	SC34	SC64	0
C4	SC34	SC74	1
C4	SC44	SC14	1
C4	SC44	SC24	1
C4	SC44	SC34	1
C4	SC44	SC44	0
C4	SC44	SC54	0
C4	SC44	SC64	0
C4	SC44	SC74	0
C4	SC54	SC14	1
C4	SC54	SC24	1
C4	SC54	SC34	1
C4	SC54	SC44	0
C4	SC54	SC54	0
C4	SC54	SC64	1
C4	SC54	SC74	1
C4	SC64	SC14	1
C4	SC64	SC24	1
C4	SC64	SC34	1
C4	SC64	SC44	0
C4	SC64	SC54	0
C4	SC64	SC64	0
C4	SC64	SC74	0
C4	SC74	SC14	0
C4	SC74	SC24	0
C4	SC74	SC34	0
C4	SC74	SC44	0
C4	SC74	SC54	1
C4	SC74	SC64	0
C4	SC74	SC74	0

Matriz de adyacencia del componente C4 (Ecosistemas acuáticos)

Ci	SCij	SCij x SCij	Y
C5	SC15	SC15	0
C5	SC15	SC25	1
C5	SC15	SC35	1
C5	SC25	SC15	1
C5	SC25	SC25	0
C5	SC25	SC35	1
C5	SC35	SC15	1
C5	SC35	SC25	1
C5	SC35	SC35	0

Matriz de adyacencia del componente C5 (Antrópico)

Ci	SCij	SCij x SCij	Y
C6	SC16	SC16	0
C6	SC16	SC26	0
C6	SC26	SC16	0
C6	SC26	SC26	0

Matriz de adyacencia del componente C6 (Abiótico)



ANEXO C

VARIABLES RELEVANTES A MÚLTIPLES NIVELES JERÁRQUICOS PARA LOS COMPONENTES BIÓTICOS DE ACUERDO A LA APROXIMACIÓN DE NOSS 1990

Variables relevantes para Flora y vegetación. Adaptado de Noss 1990.

Nivel	Composición	Estructura	Funcionamiento	Componente biótico
Genético	<ul style="list-style-type: none"> Diversidad alélica Presencia de alelos raros particulares recesivos perjudiciales Variantes cariotípicas 	<ul style="list-style-type: none"> Tamaño de la población Heterocigosidad Polimorfismo fenotípico, cromosómico Superposición de generación Heredabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> Depresión endogámica Tasa de exogamia Tasa de deriva genética Flujo de genes Tasa de mutación Intensidad de selección 	Flora zonal-azonal
Específico-poblacional	<ul style="list-style-type: none"> Abundancia Frecuencia; Valor de importancia o cobertura Biomasa Densidad 	<ul style="list-style-type: none"> Dispersión (microdistribución, macrodistribución) Estructura de la población (proporción de sexo, proporción de edad) Variables de hábitat (comunidad-ecosistema) Estructura vertical-horizontal) Variabilidad morfológica 	<ul style="list-style-type: none"> Procesos demográficos (fertilidad, tasa de reclutamiento, supervivencia, mortalidad) Fluctuaciones poblacionales Fisiología Fenología Tasa de crecimiento 	Flora zonal-azonal
Comunidad-Ecosistema	<ul style="list-style-type: none"> Identidad Abundancia relativa Frecuencia Riqueza Equidad Diversidad de especies y gremios Proporciones de endémicas, exótico, amenazado y especies en peligro Forma de vida 	<ul style="list-style-type: none"> Variables de sustrato y suelo Pendiente y aspecto de ladera Biomasa de vegetación y fisonomía densidad y estratificación; Parchado horizontal Apertura del dosel Abundancia, densidad y distribución de características físicas clave Disponibilidad de agua y recursos 	<ul style="list-style-type: none"> Biomasa y productividad tasas de herbivoría, parasitismo y depredación Colonización y tasas de extinción locales Dinámica de parches procesos de perturbación Tasas de ciclo de nutrientes 	Vegetación zonal-azonal
Regional-Paisaje	<ul style="list-style-type: none"> Identidad, distribución, riqueza y proporciones de parche (hábitat) Tipos de paisaje Patrones colectivos de distribuciones de especies (riqueza, endemismo) 	<ul style="list-style-type: none"> Heterogeneidad Conectividad Enlace espacial Tamaño de áreas/parches Fragmentación Distribución de frecuencias Relación de área perimetral Patrón de la capa de hábitat 	<ul style="list-style-type: none"> Procesos de perturbación (extensión, frecuencia, previsibilidad, Intensidad, severidad, Estacionalidad) Flujo de energía Tasas de erosión Procesos hidrológicos; Tendencias del uso de la tierra 	Vegetación zonal-azonal

Variables relevantes para Fauna Terrestre. Adaptado de Noss 1990.

Nivel	Composición	Estructura	Funcionamiento	Componente biótico
Genético	<ul style="list-style-type: none"> Diversidad alélica Presencia de alelos raros particulares recesivos perjudiciales Variantes cariotípicas 	<ul style="list-style-type: none"> Tamaño de la población Heterocigosidad Polimorfismo fenotípico, cromosómico Superposición de generación Heredabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> Depresión endogámica Tasa de exogamia Tasa de deriva genética Flujo de genes Tasa de mutación Intensidad de selección 	Fauna Terrestre
Específico-poblacional	<ul style="list-style-type: none"> Abundancia Frecuencia; Distribución de tamaños Biomasa Densidad 	<ul style="list-style-type: none"> Dispersión (microdistribución, macrodistribución) Estructura de la población (proporción de sexo, proporción de edad) Variables de hábitat (comunidad-ecosistema) Ámbito de hogar Migración 	<ul style="list-style-type: none"> Procesos demográficos (fertilidad, tasa de reclutamiento, supervivencia, mortalidad) Fluctuaciones poblacionales Fisiología Tasa de crecimiento 	Fauna Terrestre
Comunidad-Ecosistema	<ul style="list-style-type: none"> Identidad Abundancia relativa Frecuencia Riqueza Equidad Diversidad de especies y gremios Proporciones de endémicas, exótico, amenazado y especies en peligro Forma de vida 	<ul style="list-style-type: none"> Variables de ambiente Pendiente y aspecto de ladera Productividad Abundancia, densidad y distribución de características físicas clave Disponibilidad de agua y recursos 	<ul style="list-style-type: none"> Biomasa y productividad Colonización y tasas de extinción locales Dinámica metapoblacional 	Vegetación zonal-azonal
Regional-Paisaje	<ul style="list-style-type: none"> Identidad, distribución, riqueza y proporciones de parche (hábitat) Tipos de paisaje Patrones colectivos de distribuciones de especies (riqueza, endemismo) 	<ul style="list-style-type: none"> Heterogeneidad Conectividad Enlace espacial Fragmentación Distribución de frecuencias de tamaño 	<ul style="list-style-type: none"> Procesos de perturbación (extensión, frecuencia, previsibilidad, intensidad, severidad, estacionalidad) Flujo de energía Tasas de erosión Procesos climáticos Tendencias del uso de la tierra 	Vegetación zonal-azonal

Variables relevantes para Ecosistemas Acuáticos. Adaptado de Noss 1990.

Nivel	Composición	Estructura	Funcionamiento	Componente biótico
Genético	<ul style="list-style-type: none"> Diversidad alélica Presencia de alelos raros particulares recesivos perjudiciales Variantes cariotípicas 	<ul style="list-style-type: none"> Tamaño de la población Heterocigiosidad Polimorfismo fenotípico, cromosómico Superposición de generación Heredabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> Depresión endogámica Tasa de exogamia Tasa de deriva genética Flujo de genes Tasa de mutación Intensidad de selección 	Zooplancton Ictiofauna Zoobentos Fitoplancton Fitobentos Hidrofitos Acuáticas Tapetes Microbianos
Específico-poblacional	<ul style="list-style-type: none"> Abundancia Frecuencia; Valor de importancia o cobertura Biomasa Densidad 	<ul style="list-style-type: none"> Dispersión (microdistribución, macrodistribución) Estructura de la población (proporción de sexo, proporción de edad) Variables de hábitat (comunidad-ecosistema) Estructura vertical-horizontal) Variabilidad morfológica 	<ul style="list-style-type: none"> Procesos demográficos (fertilidad, tasa de reclutamiento, supervivencia, mortalidad) Fluctuaciones poblacionales Fisiología Fenología Tasa de crecimiento 	Zooplancton Ictiofauna Zoobentos Fitoplancton Fitobentos Hidrofitos Acuáticas Tapetes Microbianos
Comunidad-Ecosistema	<ul style="list-style-type: none"> Identidad Abundancia relativa Frecuencia Riqueza Equidad Diversidad de especies y gremios Proporciones de endémicas, exótico, amenazado y especies en peligro Forma de vida 	<ul style="list-style-type: none"> Variables de sustrato y suelo Pendiente y aspecto de ladera Biomasa de vegetación y fisonomía densidad y estratificación; Parchado horizontal Apertura del dosel Abundancia, densidad y distribución de características físicas clave Disponibilidad de agua y recursos 	<ul style="list-style-type: none"> Biomasa y productividad tasas de herbivoría, parasitismo y depredación Colonización y tasas de extinción locales Dinámica de parches procesos de perturbación Tasas de ciclo de nutrientes 	Zooplancton Ictiofauna Zoobentos Fitoplancton Fitobentos Hidrofitos Acuáticas Tapetes Microbianos
Regional-Paisaje	<ul style="list-style-type: none"> Identidad, distribución, riqueza y proporciones de parche (hábitat) Tipos de paisaje Patrones colectivos de distribuciones de especies (riqueza, endemismo) 	<ul style="list-style-type: none"> Heterogeneidad Conectividad Enlace espacial Tamaño de áreas/parches Fragmentación Distribución de frecuencias Relación de área perimetral Patrón de la capa de hábitat 	<ul style="list-style-type: none"> Procesos de perturbación (extensión, frecuencia, previsibilidad, Intensidad, severidad, Estacionalidad) Flujo de energía Tasas de erosión Procesos hidrológicos; Tendencias del uso de la tierra 	Zooplancton Ictiofauna Zoobentos Fitoplancton Fitobentos Hidrofitos Acuáticas Tapetes Microbianos