

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CANTIDAD Y CALIDAD DE RÍOS
UTILIZADOS COMO FUENTE DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL
SALAR DE ATACAMA**

**JUAN FCO. FIGUEROA CABELLO¹, SEBASTIÁN VICUÑA², PABLO PASTÉN^{1,3}
EDUARDO BUSTOS^{2,4}, KATHERINE DUARTE²
DAVID MORALES-MORAGA², SEBASTIÁN AEDO⁵**

RESUMEN

La agricultura que se desarrolla en los Ayllus de la Cuenca del Salar de Atacama es una actividad sensible a la disponibilidad y calidad de las aguas que se usan para el riego. Sus fuentes, los ríos San Pedro y Vilama, se caracterizan desde el punto de vista de cantidad por una alta estacionalidad y variabilidad interanual. Por el lado de calidad de agua, se caracterizan por altas concentraciones de boro (2-10 mg/l) y salinidad (2.000-3.500 mS/cm), superando en muchos casos los valores regulados por la norma chilena de aguas para riego (NCh 1.333). En este estudio se evalúan las limitaciones actuales y futuras en la cantidad y calidad de agua para producción agrícola, con el objeto de contribuir al desarrollo de estrategias de adaptación a estas condiciones. Se utilizó una herramienta de modelación usando la plataforma WEAP-MABIA que permite representar la hidrología y el uso de agua para riego en una cuenca árida. La calidad se caracterizó con un estudio estadístico de la hidroquímica de los ríos y su relación con los caudales. Luego, se analizaron escenarios climáticos futuros. Se utilizaron series climáticas corregidas y escaladas provenientes de 10 modelos seleccionados de clima global (GCM) bajo tres escenarios de emisión SSP: 1-2.6, 2-4.5 y 5-8.5. Para el periodo 2035-2065 habrá un aumento de temperatura de al menos 1°C respecto al 1985-2015, con un aumento promedio máximo de 2.5°C. Mientras que, existe incertidumbre sobre los cambios en las precipitaciones, y por consecuencia, incertidumbre en los cambios en caudal, cobertura e hidroquímica. El mayor aumento y disminución promedio de caudal medio es de 47% y 32% respectivamente, donde las variaciones se evidencian principalmente en los meses de enero a marzo. Se estima que la cobertura de riego y la evapotranspiración de cultivos tendrán en promedio una disminución leve en todos los escenarios, incluso en escenarios con aumento de caudales. De esta manera, ante eventuales aumentos de caudal, se recomienda estudiar dos limitantes respecto de posible mejora en la producción agrícola: la infraestructura de canales y estrategias de intervención para mejorar la calidad de las aguas para riego.

¹ Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: jrfigueroa@uc.cl

² Centro Cambio Global UC, Pontificia Universidad Católica de Chile.

³ CEDEUS, Centro de Desarrollo Urbano Sustentable.

⁴ Consultor Riesgo Climático UNESCO.

⁵ Stockholm Environment Institute, Latin America Center, Bogotá.

1. INTRODUCCIÓN

Para la agricultura, el agua corresponde al recurso primordial para su subsistencia y desarrollo desde tiempos prehistóricos, donde las principales fuentes de obtención de agua para riego provienen de las lluvias y ríos aledaños (Angelakis et al., 2020). En regiones áridas, los eventos de precipitación son poco frecuentes, por lo que las aguas de cursos superficiales y subterráneas pasan a ser la principal fuente de riego. Esto hace que la agricultura que se desarrolla en ambientes áridos pueda ser una actividad sensible tanto a la cantidad como a la calidad de este recurso limitado, y una de las más vulnerables a los impactos del cambio climático (García-López et al., 2019). Ante esta dependencia, los investigadores se han centrado en estudiar las proyecciones climáticas y su vínculo con la hidrología (Ndzaband, 2020) a través de series climáticas conocidas como Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés). Estos modelos permiten una representación tanto actual como proyectada del clima a una escala global y su relación con el ciclo del agua (Solomon et al., 2007). Las variaciones en el ciclo del agua toman relevancia al momento de relacionar el caudal con los parámetros fisicoquímicos del cauce debido a que estos presentan una relación directa entre ellos, por lo que el cambio en el estado de uno puede afectar el estado del otro (Depetris, 2021).

Dentro de esta problemática podemos encontrar la agricultura que se desarrolla en los Ayllus de San Pedro de Atacama. Los Ayllus corresponden a unidades socioterritoriales de familias ubicadas dentro de la cuenca del Salar de Atacama, en la región de Antofagasta del norte de Chile, donde en su interior se practica la agricultura bajo riego (Sepúlveda et al., 2015). Los ríos San Pedro y Vilama, principales fuentes de agua para riego de los Ayllus, presentan fuertes limitaciones en la cantidad y calidad de sus recursos hídricos. Diferentes estudios han determinado que estos cauces presentan altas concentraciones de arsénico, boro y en parámetros de salinidad (CNR, 2020a; CNR, 2020b; Verdugo-Vásquez et al., 2021), tal que superan los valores regulados por la norma chilena oficial 1.333 para riego (NCh 1.333, 1978).

El objetivo de esta investigación es explorar el impacto de escenarios climáticos futuros incluidos en el sexto y último informe del IPCC (2021), en los caudales y calidad de agua de los ríos San Pedro y Vilama. Esto, por medio de un modelo hidrológico integrado que permitirá generar información útil para la toma de decisiones en torno a la gestión hídrica y del riego agrícola que se desarrolla en una región árida.

2. METODOLOGÍA

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio (Ayllus de San Pedro y Vilama) se encuentra dentro de la cuenca del Salar de Atacama, hacia el centro oriente de la región de Antofagasta. Esta cuenca cuenta con una superficie aproximada de 17.000 Km² (Marazuela et al., 2020) y corresponde a una cuenca endorreica, por lo que la única entrada de agua corresponde a las precipitaciones (pluviales y nivales) y la única salida

a la evaporación directa desde el acuífero y evapotranspiración desde la superficie. Las precipitaciones se concentran en los meses de verano dado que están sujeto al sistema monzónico sudamericano (Cabrera, 2021), con máximas anuales que oscilan entre los 100 y 200 mm, teniendo lugar en las zonas altas de la cuenca, es decir, zonas norte y este. Las temperaturas llegan a su máximo en los meses de verano y al mínimo en los meses de invierno, con una media anual de 15,5°C (DGA, 2021).

Los cultivos que se trabajan en los diferentes Ayllus (siendo un total de 17 zonas agrícolas) tienen principalmente una finalidad de autoconsumo. En cuanto a la producción, los cultivos suman un total estimado de 3.165 toneladas al año sembrados en 635 ha aproximadamente. De estos, la alfalfa es la que se trabaja en mayor cantidad, en 530 ha. Sus fuentes de riego, los ríos San Pedro y Vilama, son los principales afluentes al núcleo del salar desde el extremo norte, y son unos de los pocos que mantienen un caudal constante a lo largo del año. A pesar de la cercanía entre ríos, estos mantienen diferencias significativas relativas a caudal y calidad, por un lado, el río San Pedro tiene un caudal medio anual de 837 l/s, mientras que el río Vilama uno de 152 l/s (DGA, 2021).

2.2. ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y USO DE RECURSOS HÍDRICOS

El modelo hidrológico base utilizado corresponde a una de las componentes del modelo acoplado disponible públicamente como parte del trabajo del Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca del Salar de Atacama (DGA, 2021). La componente del modelo utilizado lleva por nombre “Modelo Lateral” y se construyó en el programa *Water Evaluation And Planning System* (WEAP)⁶.

2.2.1. DESCRIPCIÓN “MODELO LATERAL”

El Modelo Lateral considera dos métodos de simulación disponibles en la plataforma WEAP, los cuales representan el volumen de suelo como dos estanques de capacidades limitadas, aunque diferenciados por el objetivo de representación hidrológica. Uno de ellos es el Método Humedad de Suelo (*Soil Moisture Method*; Sieber & Purkey, 2015), el cual se implementó en las unidades de modelación hidrológica de mayor elevación, simulando la formación y derretimiento de nieve a un paso de tiempo mensual. El otro es el Método MABIA (Sieber & Purkey, 2015) y fue utilizado en las unidades de modelación hidrológica con elevación menor a 5.000 m.s.n.m. Esta representa a paso de tiempo diario tanto los procesos hidrológicos, como los requerimientos de agua y prácticas de riego por parte de la agricultura. La simulación diaria toma relevancia en un contexto hidrológico y agrícola en ambiente árido, permitiendo una buena representación de los procesos de escorrentía versus evapotranspiración, requerimientos de agua por los cultivos y los turnos de riego los que son altamente variables durante la temporada (Sahli et al., 2012). Ambos métodos consideran como parámetros de entradas variables climáticas como la precipitación, temperatura (promedio, mínima y máxima diaria), velocidad del viento, humedad relativa y brillo solar o nubosidad.

⁶ <https://www.weap21.org/>

Considerando la relevancia del río San Pedro como afluente al Salar de Atacama, el modelo hidrológico se ajustó en base al comportamiento de este río registrado en la estación San Pedro en Cuchabrachi. Este escurrimiento se encuentra influenciado por las dinámicas de acumulación y derretimiento de nieve en las cabeceras de cuenca, así como la interacción del cauce con los acuíferos, presentando zonas de infiltración y afloramiento natural. Para representar estas interacciones, el modelo hidrológico utilizó datos de campañas de aforos de caudales en distintos puntos de este río (CNR, 2014), utilizando elementos de *sitios de demanda* capaces de extraer agua de los acuíferos y devolverla al río, y viceversa. Otros antecedentes recopilados para la calibración incluyen los parámetros asociados a la generación de escorrentía (parámetros de suelo) y caracterización de riego (sistema y turnos de riego) y vegetación (tipos de cobertura). Para evaluar esta representación del sistema hidrológico lateral, se utilizó la información de la estación fluviométrica San Pedro en Cuchabrachi entre los años 1985-2015, priorizando representar el caudal base y estacionalidad mensual de la estación. Debido a que la estación presenta problemas para registrar crecidas asociadas a lluvias de alta intensidad en el periodo estival (CNR, 2014), se omitió la representación de dichas crecidas. Si bien existe una estación fluviométrica en el río Vilama, ésta se encuentra dentro de un canal de riego de la zona, justificando la decisión de utilizar únicamente la estación del río San Pedro en Cuchabrachi.

El Modelo Lateral utilizado es capaz de representar el caudal base registrado en la estación San Pedro en Cuchabrachi (Figura 1), en torno a los 600 l/s. Según los resultados del modelo, el caudal simulado en el río Vilama, antes de entrar en los canales de riego que llevan el agua a los Ayllus, tiene un caudal base de aproximadamente 157 l/s, lo que guarda relación con las mediciones realizadas en la estación Canal Vilama de Vilama entre 1985-2015, con un valor promedio del período igual a 139 l/s. Además, los resultados de escorrentía superficial y percolación para cada subcuenca lateral son comparados con los valores de recarga total reportados por CORFO-Amphos21 (2021), obteniendo un error de un 10% como diferencia en el total acumulado.

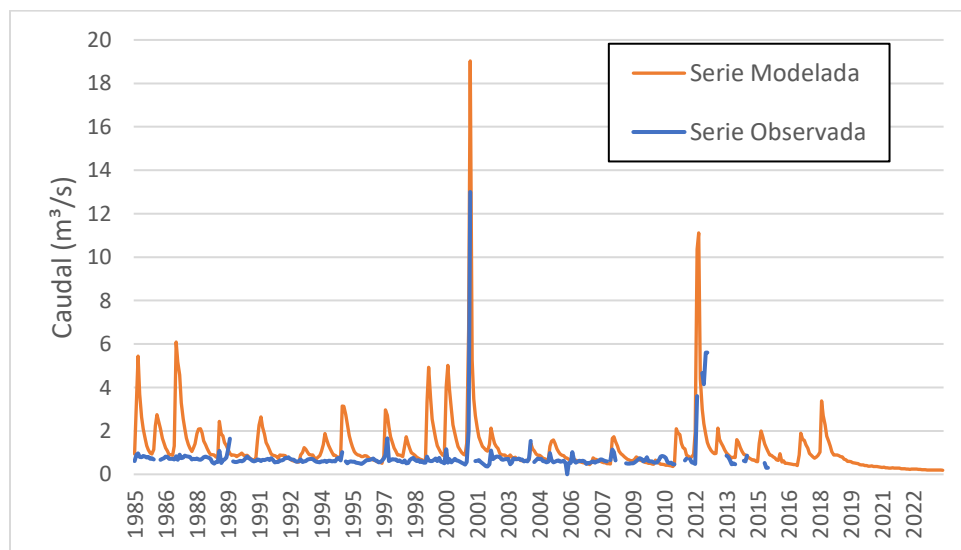


Figura 1: Caudal río San Pedro tras calibración modelo.

2.2.2. DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO

Las series climáticas requeridas para la simulación de escenarios climáticos en el Modelo Lateral fueron extraídas de la base de datos del CMIP6 a escala mensual (disponible en <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>) y generadas a escala diaria a partir de un procedimiento de tres etapas: 1) Selección de GCMs, 2) Escalamiento estadístico o Downscaling y 3) Escalamiento Espacial. La primera etapa considera la selección de los 10 mejores GCMs entre los estudiados por medio del cálculo de indicadores de sesgo que evalúan la capacidad representativa del periodo histórico 1985-2015 de un GCM y el cambio proyectado entre el período futuro (2035-2065) e histórico (1985-2015) antes y después del downscaling. La segunda etapa considera la corrección de sesgo a escala local de los GCMs por medio del método estadístico Mapeo de Cuantiles No Sesgado (UQM, por sus siglas en inglés), propuesto por Chadwick et al. (2023) y la desagregación temporal utilizando el método de los “K” vecinos más cercanos (KNN, por sus siglas en inglés), que se basa en lo planteado por Gangopadhyay (2005). Finalmente, la tercera etapa corresponde al escalamiento de las series diarias a cada *catchment* según la metodología empleada por DGA (2021) en su estudio de Plan Estratégico de Gestión Hídrica para la Cuenca del Salar de Atacama (PEGH-SdA).

2.2.3. REPRESENTACIÓN DEL RIEGO EN AYLLUS

Las prácticas de riego de los Ayllus fueron modelados en WEAP por medio de los regímenes de riego implementados en el modelo MABIA. Este módulo permite representar la frecuencia de riego, profundidad de la lámina de riego que se busca y la duración de riego. Con esto, los turnos y duración de riego provenientes de un censo realizado por la CNR (2020a; 2020b) para los ríos San Pedro y Vilama, y los postulados por la DGA (2021) para el río San Pedro, son posibles de incluir en la modelación. Se representa también la infraestructura de canales de riego instalados en la zona, modelando sus capacidades de conducción y pérdidas de agua a lo largo del trayecto (DGA, 2021). Por último, dado el método de riego por tendido utilizado, este se modela con una eficiencia de 30% según lo reportado por Antúñez & Felmer (2009), repartiendo el porcentaje restante entre percolación y evaporación directa.

2.3. ANÁLISIS CALIDAD DEL AGUA

2.3.1. REVISIÓN CONDICIONES HISTÓRICAS

Se estudiaron las campañas de medición de calidad de agua llevadas a cabo en los ríos de la zona de estudio. De estas campañas se obtuvo que ambos ríos presentan altos valores para boro, arsénico y conductividad eléctrica una vez que el río llega a la zona de cultivos. Estas altas concentraciones tienen un origen natural, es decir, es por influencia de la litología de la zona y no por actividades industriales (DGA, 2021). El río Vilama se caracteriza por tener valores superiores en boro y arsénico, y el río San Pedro valores superiores en conductividad eléctrica (salinidad). En mayor detalle, tanto para el boro como para el arsénico, se tiene que el río Vilama supera la norma en ambos parámetros desde los inicios de su cauce, mientras que el río San Pedro lo supera una vez que llegan a los Ayllus. Con el objetivo de complementar las campañas previas y ampliar el análisis

a otros posibles contaminantes, se consultaron los registros históricos de las estaciones San Pedro en Cuchabrachi y Canal Vilama en Vilama. El periodo consultado abarca los años 1980-2021. Los datos fueron depurados y analizados considerando las referencias de MMA (2017) y DGA (2019 y 2020).

Como resultado del análisis se obtuvo que los elementos que no cumplen la norma en más de un 90% de los datos depurados son el arsénico, cloruro, boro, conductividad eléctrica, molibdeno, sodio porcentual y sulfato en ambas estaciones, mientras que el aluminio (un 9%), hierro (un 7%) y manganeso (un 20%) sólo la incumplen para la estación San Pedro en Cuchabrachi. La situación del molibdeno es distinta, dado que la sensibilidad del instrumento utilizado para medir es de 0,05 mg/l, mientras que la norma establece un máximo de 0,01 mg/l. En consecuencia, dado que es un problema de sensibilidad, no se puede asegurar que el río incumpla la norma en el parámetro molibdeno. Del análisis se confirma entonces la presencia de arsénico, boro y salinidad como contaminantes principales en los ríos, los cuales superan de manera sistemática la norma.

2.3.2. RELACIÓN CAUDAL CALIDAD DE AGUAS

Los dos parámetros escogidos para estudiar su evolución en el tiempo son el boro y conductividad eléctrica (salinidad). En la Figura 2 se presentan los registros para ambos parámetros versus el caudal, de la estación San Pedro en Cuchabrachi, además de los ajustes aplicados a la estación. Los registros corresponden a aquellos casos de reciprocidad entre datos, es decir, sólo se muestran aquellos donde el día en que se midió el parámetro, también se haya medido caudal.

Se ajustan curvas a estos valores registrados obteniendo tres ecuaciones con tal de representar tres escenarios viables de concentraciones acorde a las observaciones. Estos corresponden a escenarios de Alta (A), Media (M) y Baja (B) concentración. Es posible apreciar que los registros de parámetros pueden variar para un mismo caudal, lo que puede estar ligado a influencias externas a los ríos como también a la topografía que encauza a los ríos que confluyen al río San Pedro.

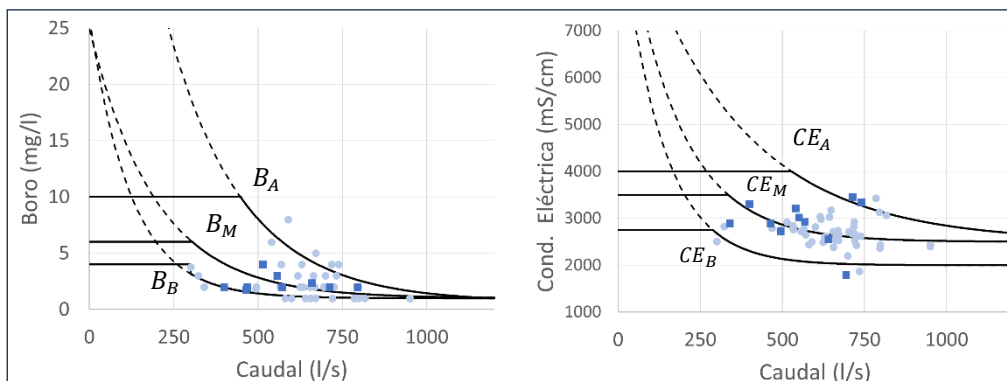


Figura 2: Caudal vs concentraciones, más ecuaciones de ajuste. En cuadrados azules los registros en los meses de verano. En círculos celestes los registros en los meses restantes.

En base a experiencias internacionales en la relación inversa entre conductividad y caudal (Weijs et al., 2013; Longobardi et al., 2018; Cano-Paoli et al., 2019), las expresiones tienen la forma de la ecuación (1), la cual busca representar tanto los valores extremos asociados a parámetro y caudal base como la curvatura de las observaciones. “ P_{esc} ” representa el parámetro (B: boro o CE: conductividad) según el escenario de concentración “esc” (A/M/B) y Q el caudal base en l/s. “A+C” representa el valor máximo que puede alcanzar el parámetro cuando el caudal es cero, el cual ha sido delimitado a un valor fijo para caudales bajos en función del valor máximo registrado para cada escenario de concentración. “A” no cuenta con unidades y “C” es mg/l para boro y mS/cm para conductividad. “B” (sin unidades) determina la curvatura del ajuste, mientras que “C” por sí solo determina el valor mínimo que puede tener el parámetro, que ha sido determinado según las observaciones.

$$P_{esc}(Q) = A * e^{B*Q} + C \quad (1)$$

2.4. INDICADORES DE ESTUDIO

Para evaluar los efectos del cambio climático en el desarrollo de la agricultura de los Ayllus de San Pedro de Atacama, se analizaron 6 indicadores: dos ligados a la hidrología, dos a la agricultura y los dos últimos a la calidad de las aguas (relacionados a los ajustes de ecuaciones previos). Para cada caso se evaluó el valor promedio anual de cada indicador, considerando un periodo histórico (1985-2015) y futuro (2035-2065) para los tres escenarios climáticos definidos previamente.

- Indicadores hidrológicos: Porcentaje de cambio del caudal medio y máximo anual
- Indicadores agrícolas: Porcentaje de cambio en la cobertura de lámina de riego y de la demanda evapotranspirativa de la alfalfa (ET_0 vs ET_a)
- Indicadores de calidad de agua: Porcentaje de cambio de la concentración media anual de los parámetros boro y conductividad eléctrica.

3. RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS DE TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES FUTURAS

El siguiente análisis es en base al cambio de las precipitaciones y temperatura media, antes de seleccionar y corregir las series climáticas. En la Figura 3 se muestran gráficamente la distribución de proyecciones de los 31 modelos estudiados para los distintos escenarios climáticos. En ella se observa que para el periodo futuro la temperatura media en la cuenca aumentará al menos 1°C, siendo un aumento promedio de 1,5°C, 1,9°C y 2,5°C según los escenarios SSP 1-2.6, SSP 2-4.5 y SSP 5-8.5 respectivamente. Para el caso de la precipitación, la incertidumbre es mayor, teniendo tanto modelos que proyectan un aumento en la variable como aquellos que proyectan una disminución. En promedio se prevé una disminución de precipitaciones en los tres escenarios de emisión, siendo una disminución promedio de 5%, 4% y 3% para los escenarios SSP 1-2.6, SSP 2-4.5 y SSP 5-8.5 respectivamente.

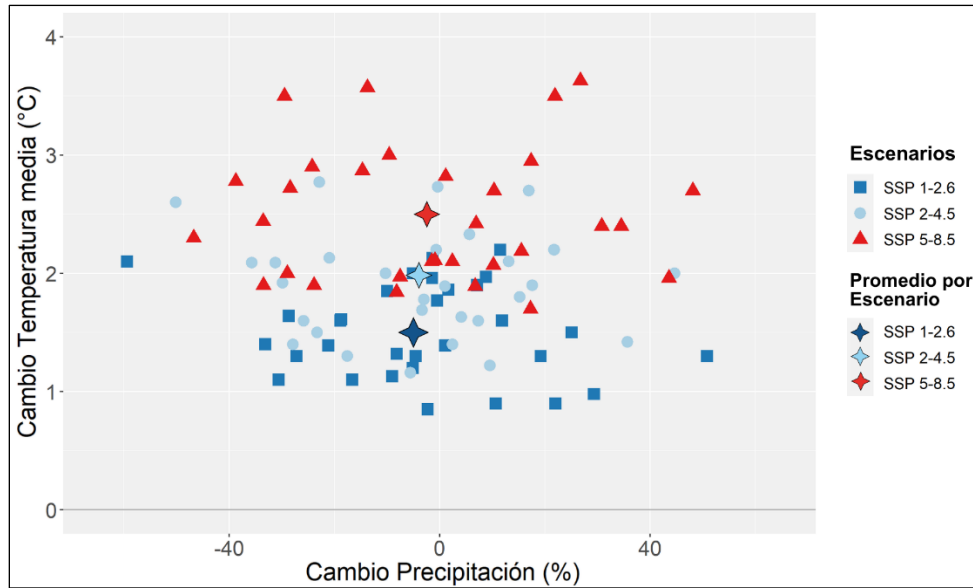


Figura 3: Cambios de proyección de temperatura y precipitación de GCMs bruto.

3.2. INDICADORES HIDROLÓGICOS

En la Figura 4 se muestran los cambios en caudal medio y máximo para el río San Pedro, cambios que son similares en magnitud para el río Vilama, por lo que el siguiente análisis es representativo de lo que se observa también en el río Vilama. En la Figura 4a se muestra la alta incertidumbre en cuanto a los cambios en caudal, asociado a la incertidumbre de las series de precipitación. Se observa también que la curva está trasladada por sobre el origen, por lo que en los casos en donde no se proyecte cambio en precipitación, pero sí un aumento de temperatura, se esperarían aumentos leves de caudal, lo cual puede estar ligado a una menor retención de agua como nieve durante los periodos de lluvia intensa e incapaz de ser compensada con una salida por evaporación. Por otra parte, en la Figura 4b se comparan los cambios en caudal medio y máximo. Cabe recordar que el modelo no se calibró en base a caudales máximos, por lo que el análisis no considera aspectos numéricos, sino más bien de comportamientos entre variables. El cuadrante de las “disminuciones” tiende a tener una relación lineal, por lo que una disminución en el caudal medio implica una disminución similar en los caudales máximos. Sin embargo, la relación, y por tanto la incertidumbre, en los “aumentos” deja de ser lineal, lo que implica que un incremento en caudal medio se correlaciona con un incremento mayor en los caudales máximos.

Para el caudal medio el escenario SSP5-8.5 es el que promedia un mayor aumento entre escenarios de emisión, igual a 47%, al considerar los modelos que proyectan aumento. Al tomar el caudal medio anual observado del río San Pedro (837 l/s) esta proyección refleja un aumento a 1.230 l/s. Considerando que un aumento de caudal medio se correlación con un aumento mayor en caudal máximo, surge la necesidad de estudiar las condiciones actuales de las infraestructuras hidráulicas construidas para la retención de crecidas y evaluar sus capacidades volumétricas y de resistencia a altas cargas hidráulicas, evitando desbordes del río y roturas de canales.

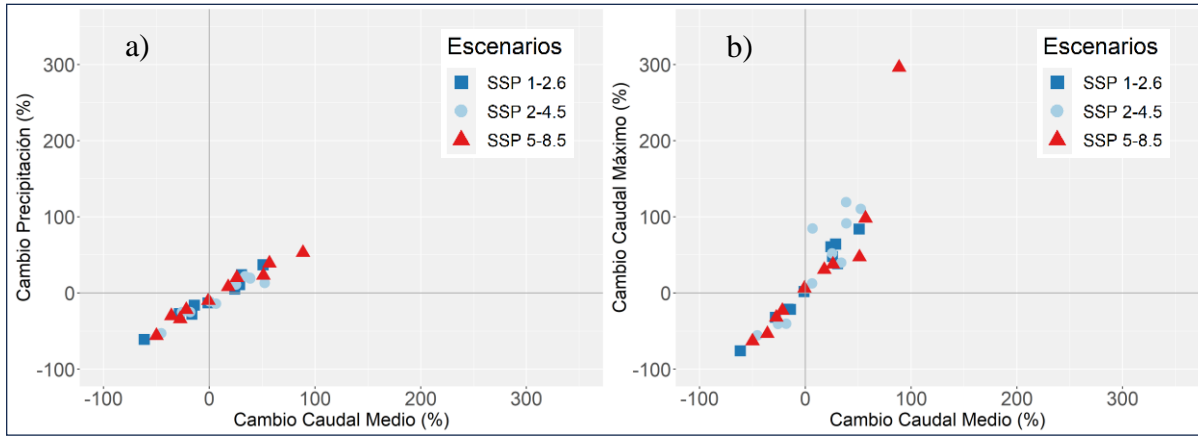


Figura 4: a) Relación entre el cambio de caudal medio y cambio en precipitación; b) Relación entre caudal medio y caudal máximo. Ambos casos la comparación es 2035-2065 y 1985-2015.

3.3. INDICADORES AGRÍCOLAS

En la Figura 5 se presentan los resultados de las proyecciones en las coberturas repitiéndose en parte la señal de incertidumbre inicial asociada al caudal. Se verifica que las coberturas son más sensibles a las disminuciones en caudal. Parte de este hecho puede ser explicado por la infraestructura de canales (pérdida de agua) y la práctica de riego (eficiencia) incluidas en la modelación, lo que limita el aumento de cobertura. En el caso de la práctica de riego, esta limita el agua que se le puede proveer a la superficie cultivada. Dado que el riego por tendido tiene una eficiencia aproximada de 30%, y aunque se mejore la infraestructura de riego, el agua que se requiere para alcanzar la lámina en todos los Ayllus es muy alta y no puede ser satisfecha. En este sentido, es necesario modificar la práctica de riego por una que demande menos agua al año, pudiendo mejorar tanto la cobertura de riego como la cobertura evapotranspirativa. Sin embargo, se debe considerar también cuál es el aporte de la práctica actual a la recarga de los acuíferos y así sucesivamente a la recarga del núcleo del Salar de Atacama.

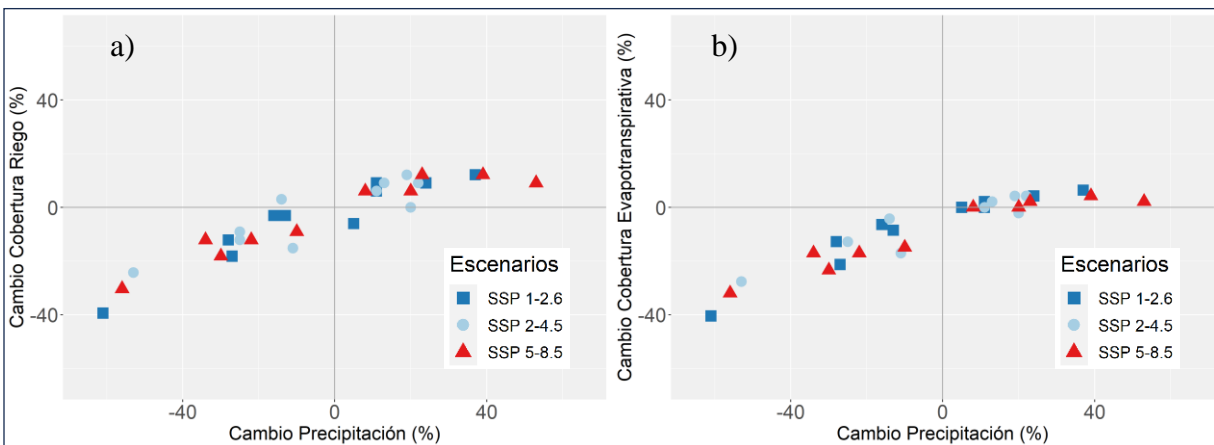


Figura 5: Relación entre cambio en precipitación y a) Cambio en la cobertura de lámina de riego y; b) Cambio en la demanda evapotranspirativa de alfalfa.

3.4. INDICADORES DE CALIDAD DE AGUA

En la Figura 6 se muestran los resultados de los cambios proyectados para los parámetros boro y conductividad eléctrica en el río San Pedro, según cada ecuación de ajuste (A/M/B) y para el escenario de emisión SSP1-2.6. Para el análisis es necesario considerar lo siguiente. Primero, que los caudales utilizados provienen de la época más seca del año, buscando estudiar el cambio de la calidad a partir del caudal base del río. En consecuencia, los parámetros no presentan mayores variaciones en los otros escenarios de emisión, dado que estos meses no perciben mayores cambios en el caudal al variar el escenario. Segundo, y considerando lo anterior, el análisis llevado a cabo en el escenario SSP1-2.6 es representativo de los otros dos, ya que estos muestran la misma relación entre variables, solo que con cambios en magnitudes.

Con esto, los resultados muestran un comportamiento esperado y ligado a la incertidumbre del caudal, es decir, situaciones de incremento y disminución de concentraciones. Sin embargo, las magnitudes de las proyecciones tienden a ser más sensibles al aumento y con el boro como el parámetro que experimenta variaciones mayores. Esto se debe al carácter exponencial de las curvas ajustadas previamente (ver Figura 2), donde los modelos que proyectan un decrecimiento de caudal provocarán un cambio mayor en los parámetros que aquellos que proyectan aumento en caudal. En los escenarios optimistas, es decir, el cuadrante de disminución de concentraciones, aún los valores se mantendrán sobre los 1 mg/l en boro y sobre los 2.000 mS/cm de conductividad, superando lo exigido por la norma NCh 1.333. Por lo tanto, es importante evaluar estrategias de intervención para combatir esta limitante de calidad, al estudiar por ejemplo alternativas de tratamiento de agua de los ríos, reutilización de aguas grises, controlar la frecuencia de riego (dentro de lo posible, ya que actualmente es bastante reducido) o controlar el volumen de agua de riego utilizado.

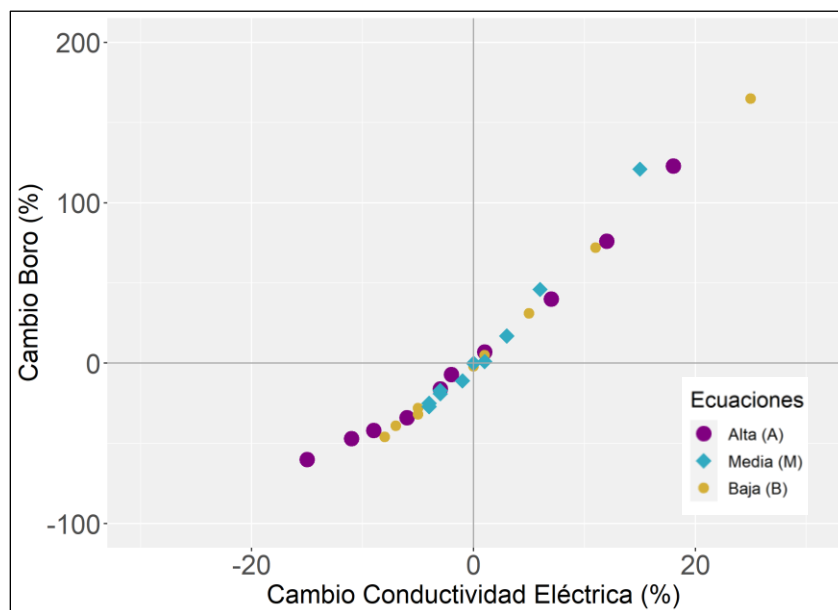


Figura 6: Cambio en conductividad eléctrica y boro según el escenario de concentración.

4. CONCLUSIONES

Se estiman aumentos de temperatura media en la zona de entre 1,5°C y 2,5°C para escenarios de menores y mayores emisiones respectivamente en el periodo 2035-2065 respecto al periodo 1985-2015. En las precipitaciones existe incertidumbre en sus proyecciones y es variable entre escenarios, donde una mitad de los GCMs estudiados proyecta un aumento de precipitaciones y la otra mitad una disminución. En consecuencia, esta incertidumbre se observa también en las variables de caudal, coberturas con relación al riego y parámetros de calidad de agua. Ahora, considerando la magnitud de las proyecciones y los mejores modelos que representan la historia, se prevé que las precipitaciones en general disminuirán. En promedio, se proyecta una disminución de 8% en el escenario SSP 1-2.6, una disminución de 6% en el escenario SSP 2-4.5, y una disminución de 3% en el escenario SSP 5-8.5.

En relación con el caudal, se ha estudiado que el caudal medio mantiene una proporcionalidad lineal con el caudal máximo en situaciones de disminución, pero una relación exponencial en situaciones de aumento. Por lo que un incremento en caudal medio se correlaciona con un aumento mayor en caudal máximo. Respecto a la cobertura de riego y cobertura evapotranspirativa de alfalfa, la cobertura histórica es bastante baja (33% y 47% respectivamente al modelar con datos observados), sin sufrir mayores cambios a futuro (reducción a 31% y 43% respectivamente). Por lo tanto, los posibles aumentos de caudal sólo serán capaces de paliar la escasez actual si se trabaja en tres limitantes claves que han sido modeladas: la capacidad de conducción en canales; pérdida de agua en canales; y la eficiencia de riego (riego por tendido). Por otra parte, en cuanto a las proyecciones de la hidroquímica del agua, los parámetros boro y conductividad muestran una mayor sensibilidad hacia el aumento de sus valores, como consecuencia de la relación entre caudal y parámetro. Por lo tanto, la variedad de especies cultivadas actualmente puede que se reduzca significativamente a futuro. Además, en los escenarios optimistas de hidroquímica, aún habrá altas concentraciones de boro y alta conductividad en el río San Pedro, manteniéndose sobre los 1 mg/l en boro y 2.000 mS/cm de conductividad eléctrica.

Ante esto, es necesario evaluar estrategias de intervención para mejorar la calidad de las aguas para riego (tratar las aguas del río, o bien, reutilización de aguas grises o de PTAS) o modificar la práctica actual (riego por tendido), ya que puede estar entregando altas concentraciones de boro y sales al suelo. Por último, cabe mencionar que el presente estudio posee limitaciones en cuanto a la modelación hidrológica, representación de la práctica de riego de los Ayllus y de calidad de agua. Esto como consecuencia de la falta de información en la zona y en toda la cuenca. Para mejorar dichas representaciones y obtener proyecciones más precisas, es necesario contar con una mayor recolección de datos sobre la hidroquímica y caudal de los ríos en las subcuencas, así como ampliar el detalle de la cobertura de cultivos utilizados en el modelo hidrológico.

REFERENCIAS

- Angelakts, A. N., Zaccaria, D., Krasilnikoff, J., Salgot, M., Bazza, M., Roccaro, P., Jimenez, B., Kumar, A., Yinghua, W., Baba, A., Anne Harrison, J., Garduno-Jimenes, A. y Fereres, E. (2020). Irrigation of World Agricultural Lands: Evolution through the Millennia. *Water*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/w12051285>
- Antúnez, B., y Felmer E., (eds.) (2009) *Nodo tecnológico de riego en el secano. Región de O'Higgins. Fase II*. Rengo, Chile: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 190. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7272>
- Cano-Paoli, K., Chiogna, G., & Bellin, A. (2019). Convenient use of electrical conductivity measurements to investigate hydrological processes in Alpine headwaters. *Science of The Total Environment*, 685, 37-49. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.166>
- Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., and Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes. *Hydrological Sciences Journal*, <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>
- CNR. (2014). Estudio de prefactibilidad mejoramiento sistema de riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26942>
- CNR. (2020a). Diagnóstico y Mejoramiento Riego Extrapredial Ayllus Río San Pedro. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32901>
- CNR. (2020b). Diagnóstico y Mejoramiento Riego Extrapredial Ayllus Río Vilama. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32901>
- CORFO-Amphos21. (2021). Actualización Modelo Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de IV-5 Atacama.
- Depetris, P. J. (2021). The Importance of Monitoring River Water Discharge. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.745912>
- DGA. (2019). Mapa Hidroquímico de Chile. <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/125469>
- DGA. (2020). Plan estratégico de gestión hídrica en la Cuenca de Aconcagua.
- DGA. (2021). Desarrollo de herramientas para el análisis de salares y cuencas costeras y su aplicación para el desarrollo del plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca del salar de atacama. <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/125704>
- Gangopadhyay, S., Clark, M., y Rajagopalan, B. (2005). Statistical downscaling using K-nearest neighbors. *Water Resources Research*, 41(2). <https://doi.org/10.1029/2004WR003444>
- García-López, J., García-Ruiz, R., Domínguez, J., y Lorite, I. (2019). Improving the sustainability of farming systems under semi-arid conditions by enhancing crop management. *Agricultural Water Management*, 223, 105718. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105718>
- Longobardi, A., Villani, P., Guida, D., y Cuomo, A. (2018). Regression approaches for hydrograph separation: Implications for the use of discontinuous electrical conductivity data. *Water*, 10(9), 1235. <http://dx.doi.org/10.3390/w10091235>
- Marazuela, M. A., Ayora, C., Vázquez-Suñé, E., Olivella, S., y García-Gil, A. (2020). Hydrogeological constraints for the genesis of the extreme lithium enrichment in the Salar de Atacama (NE Chile): A thermohaline flow modelling approach. *Science of the Total Environment*, 739, 139959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139959>
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2017). Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas.
- NCh, Norma Chilena Oficial N° 1.333. of87 Requisitos de calidad de agua para diferentes usos. Inscripción N° 49.092 por Instituto Nacional de Normalización, INN. Santiago de Chile, 20 pp. (1978).
- Ndzabandzaba, C. (2020). Change, Variability and Trend Analysis of Hydro-Climatic Time Series. In J. I. Matondo, B. F. Alemaw, y W. J. P. Sandwidi (Eds.), *Climate Variability and Change in Africa : Perspectives, Experiences and Sustainability* (pp. 9-18). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31543-6_2

- Sahli, A., Jabloun, M., Hennings, V., Muller, W., Seiber, J y Purkey, D. (2012, Marzo 14 al 18). *Evaluating uncertainty introduced to MABIA-WEAP-FAO56 soil water balance simulation model by using limited meteorological data* [35 slides]. INAD, BGR, SEI, Hannover, Alemania. https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Veranstaltungen/hydroarid_2012/download/Presentation_Sahli.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Sepúlveda Rivera, I., Molina Otárola, R., Delgado-Serrano, M. d. M., y Guerrero Ginel, J. E. (2015). Aguas, riego y cultivos: cambios y permanencias en los ayllus de San Pedro de Atacama. *Estudios atacameños* (51), 185-206. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-10432015000200012>
- Sieber, J.; Purkey, D. (2015). Water Evaluation and Planning System (WEAP) User Guide; Stockholm Environment Institute U.S. Center: Somerville, MA, USA.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Avery, K., Alley, T., Berntsen, N., Chidthaisong, J., Gregory, G., Hegerl, M., Heimann, B., Hewitson, B., Hoskins, F., Joos, J., Jouzel, V., Kattsov, U., Lohmann, T., Matsuno, M., ... Miller, H. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. In (Vol. 1).
- Verdugo-Vásquez, N., Gutiérrez-Gamboa, G., Villalobos-Soublett, E., y Zurita-Silva, A. (2021). Effects of rootstocks on blade nutritional content of two minority grapevine varieties cultivated under hyper-arid conditions in Northern Chile. *Agronomy*, 11(2), 327. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020327>
- Weijs, S.V., Mutzner, R., Parlange, M.B., 2013. Could electrical conductivity replace water level in rating curves for alpine streams? *Water Resour. Res.* 49 (1), 343–351. <http://dx.doi.org/10.1029/2012WR012181>