ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Groves, David G. et al.

Working Paper

Planificación de infraestructura hídrica para el futuro incierto en América Latina: Un enfoque eficiente en costos y tiempo para tomar decisiones robustas de infraestructura, con un estudio de caso en Mendoza, Argentina

IDB Working Paper Series, No. IDB-WP-01162

Provided in Cooperation with:
Inter-American Development Bank (IDB), Washington, DC

Suggested Citation: Groves, David G. et al. (2021) : Planificación de infraestructura hídrica para el futuro incierto en América Latina: Un enfoque eficiente en costos y tiempo para tomar decisiones robustas de infraestructura, con un estudio de caso en Mendoza, Argentina, IDB Working Paper Series, No. IDB-WP-01162, Inter-American Development Bank (IDB), Washington, DC, https://doi.org/10.18235/0003030

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/237457

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

DOCUMENTO DE TRABAJO DEL BID Nº IDB-WP-01162

Planificación de infraestructura hídrica para el futuro incierto en América Latina

Un enfoque eficiente en costos y tiempo para tomar decisiones robustas de infraestructura, con un estudio de caso en Mendoza, Argentina

David G. Groves
Michelle Miro
James Syme
Alejandro U. Becerra-Ornelas
Edmundo Molina-Pérez
Valentina Saavedra Gómez
Adrien Vogt-Schilb

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Cambio Climático

Febrero 2021

Planificación de infraestructura hídrica para el futuro incierto en América Latina

Un enfoque eficiente en costos y tiempo para tomar decisiones robustas de infraestructura, con un estudio de caso en Mendoza, Argentina

David G. Groves[1]
Michelle Miro[1]
James Syme[1]
Alejandro U. Becerra-Ornelas[1]
Edmundo Molina-Pérez[1]
Valentina Saavedra Gómez[2]
Adrien Vogt-Schilb[2]

[1] RAND Corporation
[2] Banco Interamericano de Desarrollo

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Cambio Climático

Febrero 2021

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo
Planificación de infraestructura hídrica para el futuro incierto en América Latina: un enfoque eficiente en costos y tiempo para tomar decisiones robustas de infraestructura, con un estudio de caso en Mendoza, Argentina / David G. Groves, Michelle Miro, James Syme, Alejandro U. Becerra-Ornelas, Edmundo Molina-Pérez, Valentina Saavedra Gómez, Adrien Vogt-Schilb.
p. cm. — (Documento de trabajo del BID ; 1162)
Incluye referencias bibliográficas.
1. Water-supply, Agricultural-Argentina-Planning. 2. Waterworks-Argentina-Planning. 3. Infrastructure (Economics)-Argentina-Planning. 4. Irrigation-Argentina-Planning. 5. Reservoirs-Argentina-Planning. I. Groves, David G. II. Miro, Michelle. III. Syme, James. IV. Becerra Ornelas, Alejandro Uriel. V. Molina-Pérez, Edmundo. VI. Saavedra Gómez, Valentina. VII. Vogt-Schilb, Adrien. VIII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. IX. Serie.
IDB-WP-1162

Códigos JEL: Q25, Q54
Palabras clave: escasez de agua, adaptación al cambio climático, incertidumbre

http://www.iadb.org

Copyright ©2021 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Después de un proceso de revisión por pares, y con el consentimiento previo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), una versión revisada de esta obra puede reproducirse en cualquier revista académica, incluyendo aquellas indizadas en EconLit de la Asociación Americana de Economía, siempre y cuando se reconozca la autoría del Banco y el autor o autores del documento no hayan percibido remuneración alguna derivada de la publicación. Por lo tanto, la restricción para recibir ingresos de dicha publicación sólo se extenderá al autor(s) de la publicación. Con respecto a dicha restricción, en caso de cualquier incompatibilidad entre la licencia Creative Commons IGO 3.0 Atribución-No comercial - NoDerivatives y estas declaraciones, prevalecerán estas últimas.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA HÍDRICA PARA EL FUTURO INCIERTO EN AMÉRICA LATINA

UN ENFOQUE EFICIENTE EN COSTOS Y TIEMPO PARA TOMAR DECISIONES ROBUSTAS DE INFRAESTRUCTURA, CON UN ESTUDIO DE CASO EN MENDOZA, ARGENTINA

David G. Groves[1], Michelle Miro[1], James Syme[1], Alejandro U. Becerra-Ornelas[1], Edmundo Molina-Pérez[1], Valentina Saavedra Gómez[2], Adrien Vogt-Schilb[2]

[1] RAND Corporation;[2] Banco Interamericano de Desarrollo

Agradecimientos

Por sus relevantes contribuciones a este documento el equipo agradece a Sergio Marinelli, Marcela Andino, Rubén Villodas, Guillermo Cúneo, y Juan Andrés Pina del Departamento General de Irrigación de Mendoza; a Henry Moreno Moreno y Raul Muñoz Castillo, de la División de Agua y Saneamiento del Banco Interamericano de Desarrollo; y a Adrien Vogt-Schilb y Alfred Grunwaldt de la División de Cambio Climático del Banco Interamericano de Desarrollo. Este proyecto beneficio de financiamiento de la iniciativa de energía sostenible y cambio climático del BID (RG-T2728).

RESUMEN

Los administradores del agua en muchas regiones de América Latina enfrentan desafíos cada vez mayores para satisfacer necesidades sociales asociadas al agua. Más aún, la evolución de estas condiciones en las próximas décadas es profundamente incierta e impredecible. Recientemente, los bancos de desarrollo y los fondos de agua han encargado estudios para evaluar riesgos climáticos y de otros tipos sobre los sistemas de agua y la infraestructura propuestade América Latina[1] [2]. Estos estudios han utilizado nuevos métodos para la Toma de Decisiones Bajo Incertidumbre Profunda (DMDU).

El presente estudio es una prueba de concepto para demostrar la utilidad del enfoque de Toma de Decisiones Robustas (RDM), un método DMDU, para evaluar la vulnerabilidad y las oportunidades de adaptación para la gestión de los recursos hídricos en América Latina a través de una aplicación de estudio de caso a Mendoza, Argentina.

El análisis confirma la opinión predominante de que el sistema actual de agua de Mendoza es vulnerable a los cambios en el uso de suelo y al cambio climático. En 840 futuros analizados, los resultados de la simulación mostraron que la demanda insatisfecha crece significativamente durante los períodos de sequía y también exhibe un aumento general con el tiempo. La gran mayoría de la demanda insatisfecha se produce en el sector agrícola, con una pequeña cantidad en unos pocos nodos residenciales. En el sector agrícola, los resultados muestran carencias plausibles que aumentan significativamente con el tiempo, superando el 35 por ciento en algunos años y futuros para todo el sector.

El análisis demuestra variaciones significativas de escasez proyectada entre sectores agrícolas. Se realizó un análisis de vulnerabilidad detallado en los sectores de Tulumaya y Costa de Araujo y el sector agrícola en su conjunto. Estas dos ubicaciones son áreas de riego aguas abajo que exhiben una alta demanda insatisfecha en muchos futuros. Usando herramientas de RDM, se identificaron tres condiciones generales que conducirían a una alta demanda insatisfecha en estas ubicaciones y en el sector en su conjunto: 1. Escenario de crecimiento rápido/No extremadamente húmedo; 2. Urbanización esperada / Condiciones medias o secas; y 3. Urbanización acelerada/ Condiciones secas y de calentamiento. Se evaluaron diferentes estrategias para reducir estas vulnerabilidades: un reservorio grande, una serie de reservorios más pequeños, e inversiones en riego presurizado. Estas tres opciones han sido evaluadas con anterioridad en la cuenca de Mendoza de diferentes maneras, pero este análisis representa el primer ejercicio de comparación entre ellas, y en una amplia gama de futuros plausibles que reflejan las incertidumbres climáticas y de uso del suelo.

Los resultados muestran que el aumento del almacenamiento en superficie, ya sea a través de uno o unos pocos reservorios grandes o una red de reservorios más pequeños, no mitigaría significativamente estas vulnerabilidades y sería extremadamente costoso, y por tanto las inversiones en riego presurizado podrían reducir las vulnerabilidades de manera más significativa.

[1] Lima, Perú (Groves et al. 2018; Kalra et al. 2015); Monterrey, México (Molina-Perez et al. 2019); Ciudad de México, México (en proceso); y La Paz, Bolivia (Escobar, Lima, Purkey, Yates, & Forni, 2013); (Purkey, et al., 2018)).

[2] Lima, Perú (Groves et al. 2018; Kalra et al. 2015); Monterrey, México (Molina-Perez et al. 2019); Ciudad de México, México (en proceso); y La Paz, Bolivia.

RDM proporciona un marco analítico útil para evaluar tanto los desafíos futuros que enfrenta Irrigación, como diferentes estrategias que podrían utilizarse para mitigar la escasez futura. Este análisis puede ser fortalecido de manera significativa mediante iteraciones adicionales del enfoque RDM, que incorpore las demandas de agua urbana de manera mas representativa, así como una mejor representatividad de escenarios climáticos extremos como sequías aún más graves y largas.

INTRODUCCIÓN

Los administradores del agua en muchas regiones de América Latina enfrentan desafíos cada vez mayores para satisfacer necesidades sociales asociadas al agua, debido al rápido crecimiento demográfico y económico, la expansión del riego, los cambios en el clima y la hidrología, y la degradación de los recursos y ecosistemas de aguas subterráneas. Más aún, la evolución de estas condiciones en las próximas décadas es profundamente incierta e impredecible. En respuesta, los bancos de desarrollo y las empresas de servicios públicos en América Latina están invirtiendo miles de millones de dólares en proyectos de gestión de agua para las próximas décadas. Antes de realizar tales inversiones, ciertas preguntas debieran formularse :

- ¿Cómo podrían los cambios en las condiciones futuras afectar estas inversiones?
- ¿Serán estas inversiones lo suficientemente robustas - o tendrán un rendimiento suficientemente bueno en una amplia gama de futuros posibles?

Responder estas preguntas requiere pensar sobre la evaluación de las necesidades y soluciones de los recursos hídricos de manera diferente. Primero, debido a que impulsores importantes de las condiciones futuras son altamente inciertos (y no se calculan fácilmente con probabilidades), un planificador o financiador debe considerar cómo las inversiones propuestas se desempeñarían en una amplia gama de futuros plausibles. En segundo lugar, también es cada vez más importante y necesario involucrar a las partes interesadas en el proceso de planificación y toma de decisiones. Como tal, es crítico llevar el análisis a los interesados e involucrarlos en la evaluación de la infraestructura y la toma de decisiones. Por último, aunque los datos y los modelos nunca son tan completos como se desearía, la complejidad de la planificación de los recursos hídricos requiere necesariamente una evaluación cuantitativa de los recursos hídricos futuros y de las necesidades locales.

Recientemente, los bancos de desarrollo y los fondos de agua han encargado estudios para evaluar riesgos climáticos y de otros tipos sobre los sistemas de agua y la infraestructura propuesta de América Latina[3] Estos estudios han utilizado nuevos métodos para la Toma de Decisiones Bajo Incertidumbre Profunda (DMDU) (Marchau et al. 2019) para evaluar sistemas de gestión del agua en muchos futuros plausibles e identificar estrategias robustas. Reconociendo que estos estudios a menudo son más costosos y requieren más tiempo de lo que podría replicarse ampliamente en toda América Latina, el Banco Mundial desarrolló el Marco del Árbol de Decisiones (Ray and Brown 2015) para ayudar a identificar situaciones para las cuales

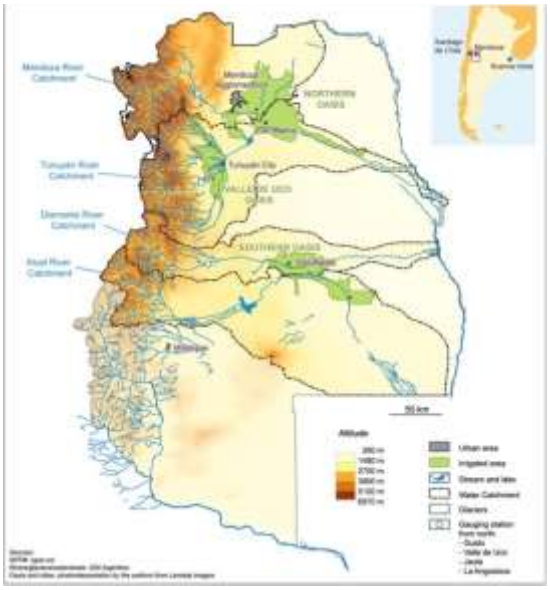
[3] Lima, Perú (Groves et al. 2018; Kalra et al. 2015); Monterrey, México (Molina-Perez et al. 2019); Ciudad de México, México (en proceso); y La Paz, Bolivia.

se justifica un análisis de robustez completo, basado en los efectos climáticos esperados. Para los sistemas que enfrentan una sensibilidad climática significativa, se recomienda un análisis de robustez exhaustivo.

El presente estudio se basa en estos estudios previos y presenta un enfoque replicable y costo y tiempo-eficiente para desarrollar análisis robustos de sistemas de agua en América latina, que aplica métodos DMDU. Este enfoque se basa en Toma de Decisiones Robustas (RDM) (Lempert 2019) y es consistente con otras versiones de la metodología DMDU. Es importante destacar que, si bien este enfoque está diseñado para abordar riesgos climáticos, también permite incorporar otras incertidumbres importantes de manera consistente y sistemática. Este enfoque se demuestra a través de una aplicación de estudio de caso a Mendoza, Argentina.

Antecedentes del Caso de Estudio: Mendoza, Argentina

Figura 1. Abastecimiento de agua superficial en Mendoza, Argentina



La región de Mendoza, Argentina, se encuentra en las estribaciones de la Cordillera de los Andes (Figura 1) y alberga una industria agrícola expansiva y de importancia nacional que se centra principalmente en la producción de vino y otros cultivos de frutas. Los suministros de agua superficial de la región, que se originan en la zona de alta montaña y se alimentan en gran medida de nieve y deshielo glacial, fluyen hacia una llanura árida inferior con cuencas interconectadas de agua subterránea aluviales subyacentes. En conjunto, estos sirven como las principales fuentes de suministro utilizadas para satisfacer las demandas predominantemente agrícolas de la región. Las áreas urbanas también requieren agua para uso residencial, comercial e industrial. Si bien estos recursos han sido suficientes para satisfacer la demanda hídrica urbana durante las últimas décadas, durante los períodos de sequía, las áreas agrícolas de regadío no obtienen el agua necesaria para la producción agrícola completa. Específicamente, la región de Mendoza está experimentando su décimo año consecutivo de crisis hídrica, que comenzó en 2009 cuando el flujo anual promedio cayó por debajo del promedio histórico de la región debido a la escasez de nevadas y una capa de nieve por debajo de lo normal.

Hay otros desafíos a largo plazo que complican la escasez de agua, que incluyen: i) aumento de las temperaturas que aumentan la demanda de agua de los cultivos y aumentan las necesidades de riego; ii) disminución de la precipitación media anual; iii) derretimiento de glaciares; iv) falta de estudios técnicos sobre los acuíferos, lo que dificulta una gestión adecuada de las aguas subterráneas en algunas subcuencas; entre otros. Mendoza ya está considerando una serie de estrategias potenciales para abordar estos problemas, principalmente: un nuevo depósito grande para abordar la variabilidad estacional e interanual y / o una serie de pequeños depósitos a lo largo de la llanura de inundación para almacenar agua y recargar los recursos de agua subterránea.

Las partes locales interesadas, incluido el Departamento General de Irrigación (en adelante, Irrigación), se beneficiarían de un análisis que les ayude a comprender mejor cuál de estos enfoques, u otros, abordaría de manera rentable sus necesidades de gestión del agua en un futuro incierto. Es decir, estrategias de infraestructura y gestión que estén diseñadas o implementadas de manera tal que desempeñen su función independientemente de los cambios climáticos y demográficos futuros.

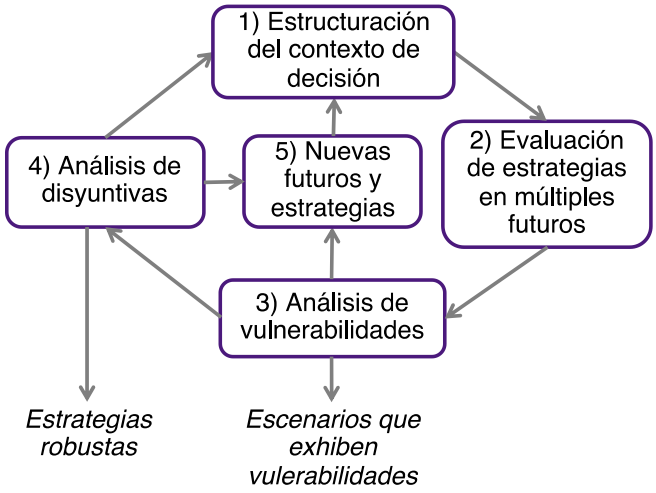
UN ENFOQUE REPLICABLE DE RDM

Este estudio presenta un enfoque estandarizado para utilizar Toma de Decisiones Robustas (RDM) para caracterizar las amenazas a largo plazo sobre la gestión del agua y evaluar la solidez de las diferentes opciones de gestión e inversión. Este enfoque tiene una duración de un año e incluye involucramiento directo con las partes interesadas. Este estudio ilustra este enfoque a través de un estudio de caso en Mendoza, Argentina.

RDM es un proceso iterativo que incluye una combinación de participación de actores, modelamiento y análisis para dar cuenta de incertidumbres de difícil abordaje, como efectos del cambio climático, y para facilitar consenso sobre acciones que comprendería una estrategia sólida. Se ha utilizado con éxito en ejercicios de multinauales para apoyar la planificación del agua en América Latina.

La siguiente figura muestra los pasos iterativos que se presentan típicamente en los estudios de RDM.

Figura 2. Pasos iterativos de un proceso RDM



Cada estudio que usa el metodo de RDM usa como base la Figura 2 pero adapta los pasos a las necesidades de dicho estudio. Para los propósitos de este estudio, aplicamos este marco iterativo en Figura 2 para formar cinco pasos que se llevaron a cabo durante un período de 12 meses.

1. **Involucrar a las partes interesadas en cuestiones clave, decisiones e información técnica disponible (mes 1):** El Paso 1 del análisis comienza con el Taller de marco de decisiones con socios locales en el país. En este taller se discuten los elementos clave del marco de decisión que se evaluarán

durante el estudio, incluidas las incertidumbres clave (Xs), las medidas de rendimiento relevantes (Ms), las posibles estrategias de gestión del agua y las opciones de infraestructura (Ls), y los modelos y datos del sistema de agua disponibles (R). Esta información se resume en una tabla XLRM.

2. Recopilar datos y modelos (meses 2 a 4): A continuación, el equipo cuantifica las incertidumbres clave del Paso 1 como un rango de futuros plausibles a través de la recopilación de información climática disponible para la elaboración de escenarios climáticos futuros y escenarios demográficos y de demanda de agua alternativos. Con esta información, los investigadores diseñan experimentos y emplean modelos para probar el desempeño de los sistemas de agua bajo estos posibles futuros.
3. Caracterizar las vulnerabilidades clave (meses 5 a 6): El equipo identifica las vulnerabilidades clave en los sistemas de agua mediante la evaluación del desempeño del sistema en el rango de futuros plausibles previamente definidos. Los resultados se analizan para identificar las condiciones futuras inciertas clave que estresarían el sistema de gestión del agua. Los resultados se comparten con las partes interesadas durante un taller interactivo.
4. Evaluar los beneficios y los costos de las propuestas de infraestructura (meses 7 a 9): En función del análisis de vulnerabilidad y la participación de las partes interesadas, se identifican una o más propuestas de infraestructura o de gestión de agua para mejorar el rendimiento del sistema. Estas estrategias luego se evalúan a en el rango de condiciones futuras plausibles (como en el Paso 3) para cuantificar los beneficios y costos de cada opción propuesta. Los cambios en la robustez del sistema se calculan y comparan con los costos de cada opción o combinación de opciones y luego se presentan como compensaciones para ser consideradas por las partes interesadas.
5. Deliberar sobre las compensaciones de robustez y costo (meses 10 a 12): En el último paso, el equipo de estudio trabaja directamente con los socios en el país para deliberar sobre las compensaciones de costo y robustez de las opciones de infraestructura analizadas en el Paso 4. Dependiendo de los recursos disponibles, tales deliberaciones podrían ocurrir a través de un taller final en el país o mediante una serie de videoconferencias específicas.

El enfoque evalúa sistemáticamente las vulnerabilidades de la infraestructura actual del agua y los sistemas de gestión, así como la efectividad de las inversiones propuestas en la gestión del agua para reducir esas vulnerabilidades. Los resultados de esta evaluación se detallan en un taller final en el país y en un informe de estudio. Estos proporcionan una visión general concisa de todo el proyecto, dirigido a diferentes audiencias (formuladores de políticas, partes interesadas con formación técnica y el público general), así como a la presentación y debate de la estrategia final de adaptación robusta de la gestión del agua. Este enfoque eficiente en cuanto a costos y tiempo para tomar decisiones robustas de infraestructura se puede implementar para apoyar tanto a los bancos de desarrollo como a las entidades de agua de América Latina, donde el presupuesto, el tiempo y la participación de los socios pueden ser limitados, pero las decisiones de inversión e infraestructura deben ser climáticamente inteligentes y tener un buen desempeño ante las condiciones cambiantes en las próximas décadas.

Progreso del Caso de Estudio de Mendoza

Paso 1) Involucramiento con las partes interesadas sobre cuestiones clave, decisiones e información técnica disponible.

El primer paso del análisis comenzó con el taller de marco de decisiones con socios locales que tomó lugar en las oficinas centrales de Irrigación en Mendoza durante la semana del 15 de octubre del 2018. Los participantes[4] discutieron los elementos claves del marco de decisión que se evaluarían durante el estudio - incertidumbres (X), las medidas de rendimiento relevantes (M), las estrategias de gestión del agua y las opciones de infraestructura (L), y los modelos (R). Las partes interesadas acordaron que los principales factores con mayor incertidumbre que impulsan las condiciones de gestión están relacionados con la demanda urbana, la demanda agrícola, condiciones climáticas y los recursos de agua subterránea. Otras incertidumbres fueron también discutidas. Las métricas más cruciales usadas para medir el desempeño del sistema de Mendoza incluyen: demanda insatisfecha de agua, costos de infraestructura, disponibilidad de recursos subterráneos de agua. Las partes interesadas describieron una variedad de diferentes opciones de gestión, pero las discusiones subsecuentes con Irrigación condujeron a un enfoque sobre almacenamiento en superficie y a comparar dos enfoques alternativos: un proyecto para una represa multipropósito de gran capacidad, y un sistema distribuido de represas más pequeñas. Finalmente, Irrigación proporcionó el modelo existente, a modificar, de la cuenca del río Mendoza para apoyar este estudio. La matriz "XLRM" a continuación (Tabla 1) resume el alcance final del análisis.

Tabla 1. Matriz XLRM para el caso de estudio de Mendoza, Argentina

Incertidumbres (X)	Opciones (L)
• Tendencias de temperatura y precipitación que reflejen el cambio climático. • Secuencias alternantes de años húmedos y secos que reflejen el cambio climático. • Cambios en el uso urbano de agua (doméstico/comercial e industrial) • Superficie irrigada, por tipo de cultivo • Transición del uso de suelo de irrigación a urbano	• Sistema actual (SA) • SA + proyecto de represa multipropósito de gran capacidad • SA + sistema distribuido de represas más pequeñas
Modelos (o relaciones) (R)	**Medidas de desempeño (M)**
• Modificación al modelo del Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP, por sus siglas en inglés) de la cuenca del río Mendoza y el bombeo de agua subterránea	• Demanda mensual de agua por nodo

[4] Se invitaron representantes del Departamento General de Irrigación, la Secretaria de Ambiente, inspectores de cauce y asociaciones de inspecciones de cauce de la cuenca del río Mendoza y de la cuenca del Tunuyan superior, Municipios de la cuenca, la Subsecretaría de Energía, la Empresa Emesa, los Operadores de agua potable y saneamiento, las Universidades Nacional de Cuyo y de Mendoza, del Instituto Agua y Ambiente, las divisiones de agua y saneamiento y cambio climático del BID, y la RAND.

	• Demanda insatisfecha de agua (términos absolutos y porcentuales de la demanda anual) • Agotamiento de aguas subterráneas • Uso de agua por sector y suministro asociado de aguas superficiales o subterráneas • Producción agrícola anual (representada por la superficie irrigada por tipo de cultivo) • Costo de los proyectos en consideración

PASO 2) COMPILACIÓN DE DATOS Y MODELOS

En el segundo paso, el equipo del proyecto trabajó con Irrigación para adaptar el modelo WEAP a este estudio y desarrollar datos para definir un conjunto de futuros inciertos.

ADAPTAR EL MODELO EXISTENTE DE GESTIÓN DE AGUA

El equipo del proyecto realizó un número de actualizaciones al modelo WEAP de la cuenca de Mendoza. Específicamente, el equipo:

- Extendió el modelo a 2050
- Reconectó la cuenca superior para habilitar el cálculo de los efectos climáticos a través de WEAP
- Removió los efectos previstos del cambio climático de la hidrología base
- Agregó dimensiones de incertidumbre para población, tarifas de uso municipal de agua per cápita, actividad industrial, almacenamiento subterráneo, y cambio climático (como cambios a la precipitación y temperatura promedio a lo largo del tiempo)
- Agregó mecanismos para permitir la ejecución del modelo en lotes utilizando un conjunto de escenarios discretos para cada incertidumbre
- Generó tablas de datos de escenarios WEAP generados para:
    - Tarifas de uso municipal de agua y de población: basadas en modelos existentes
    - Actividad industrial y almacenamiento subterráneo de agua: basado en escenarios ilustrativos
    - Cambio climático: basado en ejecuciones de modelos generales de circulación (GCM, por sus siglas en inglés) cuadriculadas y escaladas
- Actualizó bases de datos de entrada para incluir observaciones más actualizadas (por ejemplo, población, precipitación, etc.)
- Proporcionó a Irrigación, como parte de la creación de capacidad, secuencias de comandos para ejecutar WEAP en lotes con parámetros de entrada actualizados

DEFINIENDO FUTUROS PLAUSIBLES

Con el modelo WEAP adaptado al marco de decisión establecido en la matriz XLRM, el equipo desarrolló escenarios futuros plausibles basados en las incertidumbres (X) clave definidas por los actores de la cuenca.

Condiciones Hidrológicas

El equipo desarrolló escenarios para evaluar el sistema de gestión de Mendoza bajo condiciones hidrológicas futuras utilizando una aproximación Delta modificada. El equipo comenzó con series de tiempo históricas disponibles (2000-2016) de temperaturas mensuales y precipitación de 18 estaciones meteorológicas en la cuenca del río Mendoza que fueron incluidas en el modelo WEAP. Las series de tiempo de cada una de las 18 estaciones se usaron para desarrollar una serie de tiempo base de precipitaciones futuras mediante ciclos históricos hasta 2050. Las series de tiempo históricas y futuras para los 18 puntos fueron interpoladas espacialmente para crear valores de entrada de precipitación y temperatura para cada uno de los 76 puntos de captación de los modelos de WEAP.

Para poder reflejar las tendencias de temperatura y precipitación afectadas por el cambio climático y la posibilidad de futuras sequías, se desarrollaron futuros estados hidrológicos mediante la modificación de las series de tiempo base. Primero, se desarrollaron dos series de tiempo alternativas de la precipitación las cuales representan la recurrencia de una sequía más duradera que la línea de base, 1 y 2 años más, respectivamente. Estas series de tiempo fueron generadas proyectando periodos de sequías más largos que los históricos para cada una de las series de tiempo de precipitaciones incluidas en el modelo WEAP. Luego, se desarrolló un conjunto de futuros en donde varían la precipitación y la temperatura por los cambios, o deltas, en variables que se muestran en los outputs al 2050 del modelo climático global AR-5 IPCC. La resolución espacial de los datos del modelo de clima global AR-5 fue suficiente para aplicar cambios en precipitación y temperatura para cada una de las 18 estaciones meteorológicas del modelo WEAP. Tanto para el método Delta como para la generación de secuencias hidrológicas alternativas, el equipo de estudio modificó el orden o la magnitud de la serie de tiempo de precipitación de entrada según lo establecido por DGI. Las estimaciones de acumulación de nieve de alta montaña en el modelo WEAP también se ajustaron para reflejar las secuencias hidrológicas alternativas y los deltas de precipitación y temperatura. Esto permite que las simulaciones representen los efectos combinados del aumento de la sequía, los cambios en las precipitaciones y las temperaturas más cálidas tanto en las zonas de alta montaña como en los valles.

Escenarios de Uso de Suelo

Los siguientes escenarios describen seis futuros alternativos que representan cambios potenciales en los usos de suelo y urbanización. Estos escenarios fueron aplicados a la cuenca del río Mendoza. Los datos requeridos por cada escenario se detallan a continuación:

- Tendencias actuales: este escenario es el “caso base” y utiliza como herramienta de pronóstico las tendencias históricas de crecimiento del área urbana, de los usuarios industriales y de los cambios al uso de suelo. Este escenario también asume una composición de cultivos constante en el área agrícola.
- Urbanización acelerada: este escenario representa un desarrollo acelerado de la población urbana y de los usuarios industriales, así como una contracción del área irrigada en las áreas agrícolas de la cuenca del río Mendoza.

- Expansión de la agricultura: este escenario representa un proceso de urbanización más lento e incluye la expansión de nuevas áreas de irrigación (a través de la rehabilitación de tierras abandonadas o la expansión agrícola a nuevas áreas). Aunque existe crecimiento en las zonas agrícolas, este escenario asume que la composición de los cultivos en la zona agrícola se mantiene constante. Aplicamos la expansión agrícola a los cultivos de Vid, Hortícolas, Frutas y Olivo. También mantuvimos constante el área total en cada nodo agrícola a través de la eliminación de área para otros usos de suelo (recientes, antiguos, bosque, pastoral) en cada nodo.
- Conversión de cultivos: este escenario representa una tasa de urbanización que refleja tendencias históricas e incluye una transformación en los cultivos principalmente de vino a mayormente fruta en el área noroeste de la cuenca de Mendoza.
- Crecimiento rápido: este escenario representa incrementos en la urbanización (a través de mayor densidad del área urbana y de la conversión de tierra para uso urbano), así como, una expansión de la tierra de uso agrícola. Esto se logra combinando los escenarios "Urbanización acelerada" y "Expansión de la agricultura".

La Tabla 2 presenta los valores iniciales de estos escenarios.

Tabla 2. Valores iniciales de los escenarios de uso de suelo

	Tendencias Actuales	***Urbanización Acelerada***	***Expansión de la Agricultura***	***Conversión de Cultivos***	***Crecimiento Rápido***
Población urbana *(cambio porcentual por año)*	Tendencias históricas	2.2	0.5	Tendencias históricas	2.2
Número de usuarios industriales *(cambio porcentual por año)*	Tendencias históricas	1	0	Tendencias históricas	1
Uso de suelo agrícola *(cambio porcentual de superficie por año)*	Tendencias históricas	-1	1	Tendencias históricas	1
Uso doméstico de agua per cápita *(cambio porcentual por año)*	Tendencias históricas	-1.5, 0.2	-1.5, 0.2	Tendencias históricas	-1.5, 0.2
Uso industrial de agua por cliente *(cambio porcentual por año)*	Tendencias históricas	-1, 0.2	-1, 0.2	Tendencias históricas	-1, 0.2
Porcentaje de superficie sembrada con uvas de vino	Estático en el último año del modelo	Estático en el último año del modelo	Estático en el último año del modelo	50% más bajo que el último año del modelo para el noroeste de Mendoza	Estático en el último año del modelo

Futuros Plausibles

Combinando las variaciones en el uso del suelo y las condiciones hidrológicas, el equipo de estudio desarrolló el siguiente conjunto de futuros:

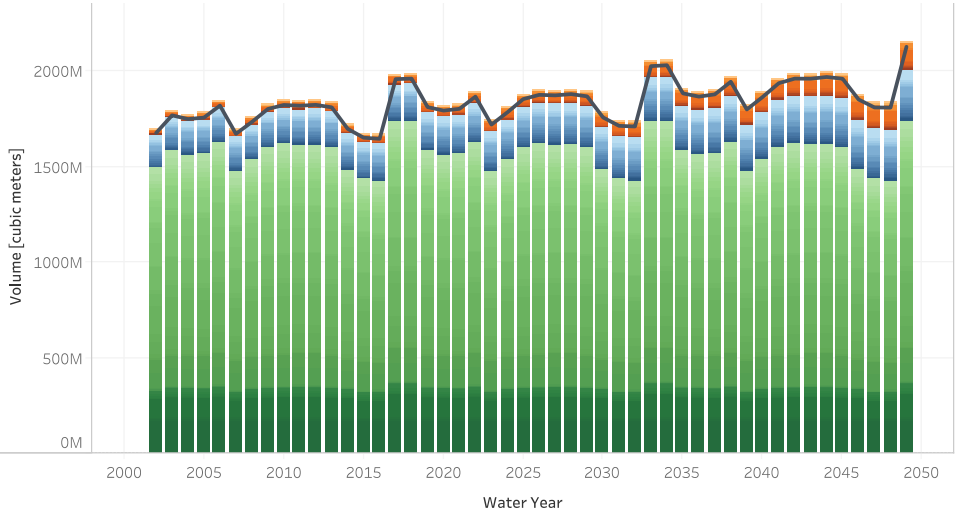
5 Proyecciones de Uso de Suelo X 3 Variabilidad Hidrológica X 56 Tendencias climáticas = 840 Total

Un caso futuro usado como base se definió con las siguientes especificaciones: Tendencias actuales del escenario de uso de suelo + variabilidad histórica hidrológica, y sin tendencias climáticas.

RESULTADOS DEL CASO BASE

El modelo del sistema de agua genera información sobre múltiples aspectos del sistema de agua de Mendoza para cada futuro. Para Mendoza, algunos resultados clave incluyen la oferta disponible del río Mendoza, los cambios en el almacenamiento subterráneo, la demanda en varios nodos agrícolas y urbanos, así como cualquier demanda no satisfecha. La Figura 3 muestra la demanda total de agua en el futuro base para todos los nodos en el modelo durante los años 2002-2049, agrupada por nodos: irrigación (verde), domésticos (azul), y comercial (naranja). Nótese que existe un incremento gradual en la demanda proyectada, así como una variabilidad interanual considerable.

Figura 3. Demanda por nodo para el futuro base

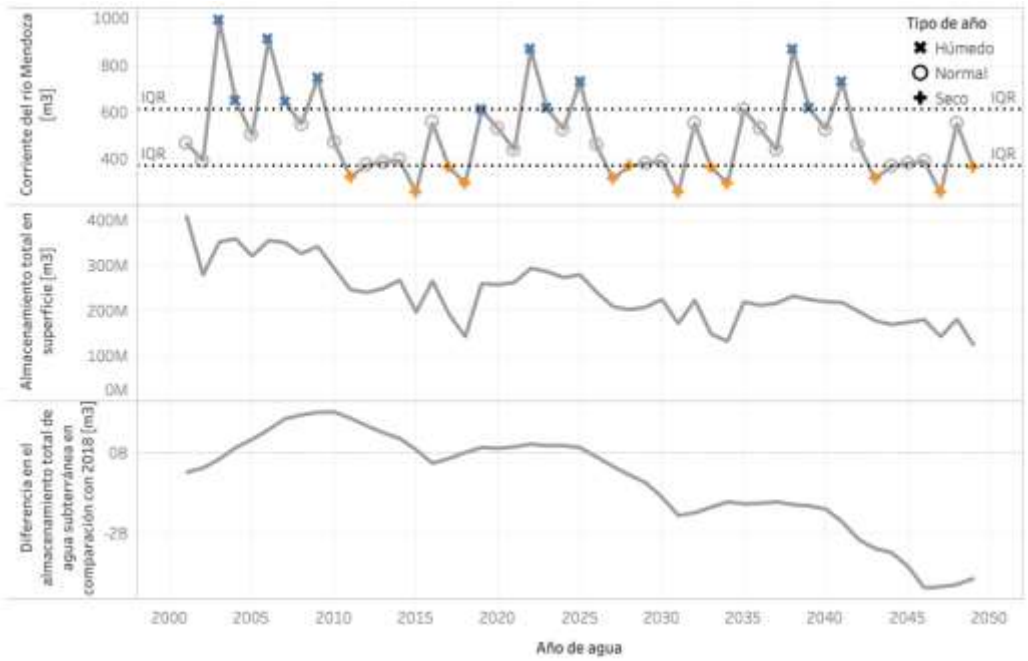


Nota: los colores corresponden a los diferentes tipos de nodos: verde = agrícola, azul = doméstico, naranja = comercial.

La Figura 4 muestra bajo los supuestos del caso base: el flujo proyectado del río Mendoza, el volumen total de las represas en la región, y la extracción de agua subterránea. El panel de flujo del río Mendoza muestra una variabilidad interanual significativa y una etapa de sequía extendida en el periodo 2011-2018 (consistente con las mediciones de los registros históricos). Esta sequía se repite comenzando en 2027 y una vez más en 2043. La superficie total almacenada (panel central) muestra cierta variabilidad interanual, así como una pequeña disminución debido a la sedimentación de la represa principal de Mendoza, el Dique

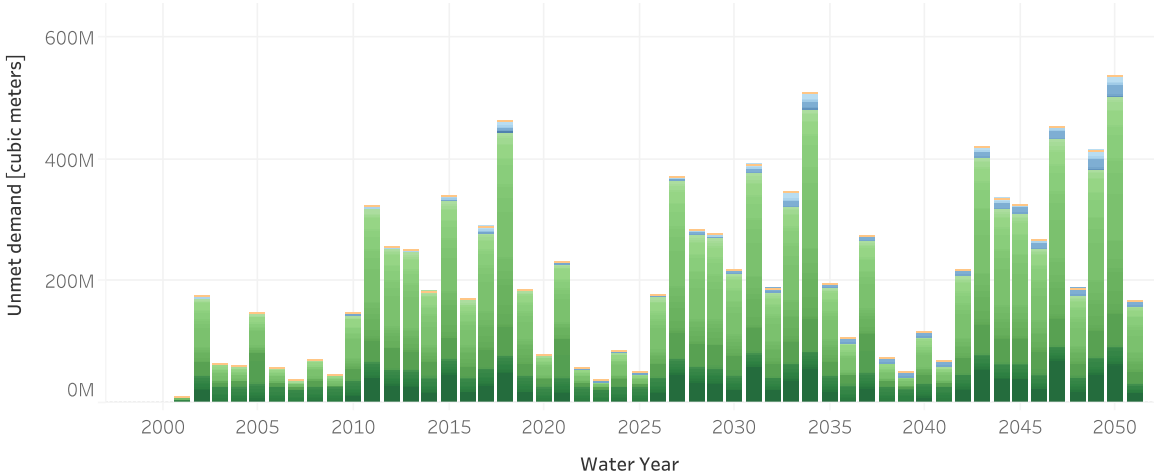
Potrerillos. Finalmente, cambios en el almacenamiento subterráneo de agua desde una línea de base en 2018 muestra una disminución, la cual refleja tasas de bombeo mayores a las tasas de reposición.

Figura 4. Flujo de corriente del río Mendoza, almacenamiento total de represas, y cambios en volúmenes de agua subterránea



La Figura 5 muestra la demanda no satisfecha para todos los sectores (agrícola, comercial, y residencial) bajo los supuestos del escenario base. La gran mayoría de la demanda no satisfecha ocurre en el sector agrícola, con una pequeña cantidad en algunos de los nodos residenciales. Esta demanda aumenta significativamente durante los periodos de sequía y exhibe un incremento general a lo largo del tiempo.

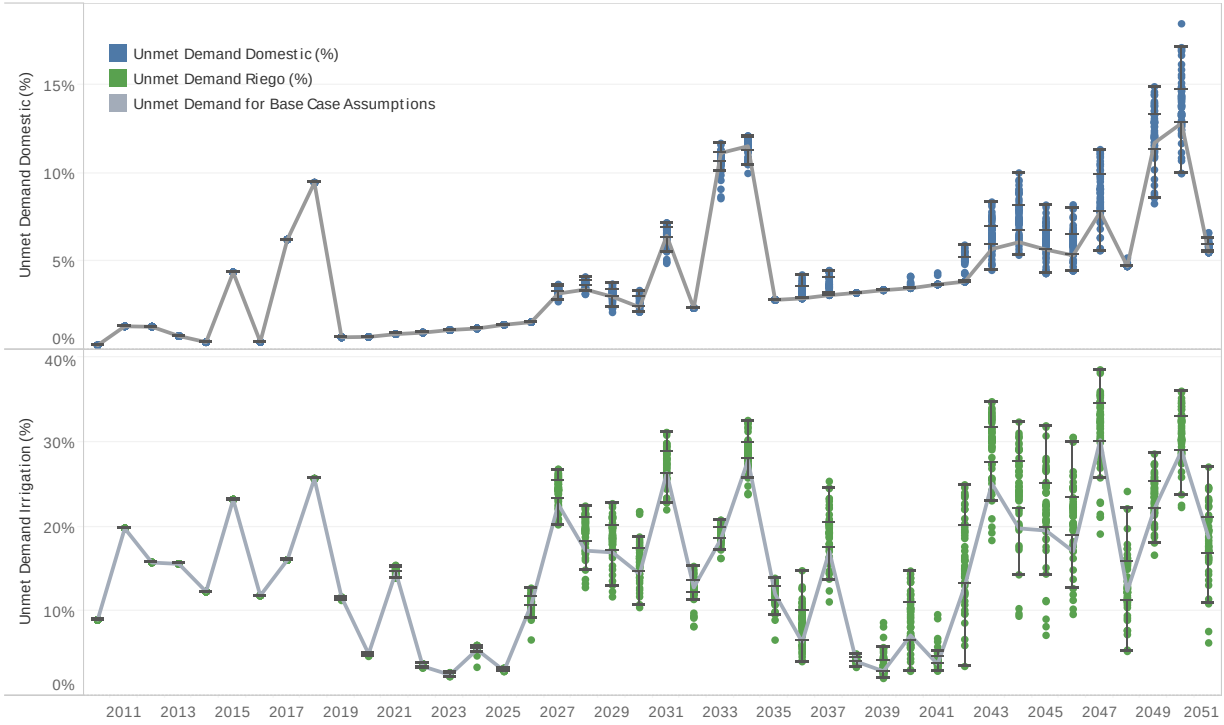
Figura 5. Demanda insatisfecha bajo los supuestos del escenario base



Nota: Los colores corresponden a los diferentes tipos de nodos: verde = agrícola; azul = doméstico; naranja = comercial.

Como se muestra en la Figura 6, la demanda insatisfecha para los nodos domésticos y de riego varía a lo largo de los diferentes escenarios futuros. En el caso de los nodos domésticos, la escasez aumenta en años secos. Durante años húmedos, la escasez es pequeña, con un mínimo cada vez mayor asociado a un nodo que tiene una restricción de infraestructura en el suministro de agua. La demanda insatisfecha generalmente se encuentra por debajo del 5 por ciento, a excepción de los años de sequía y en los últimos años del período de simulación. La demanda agrícola no cubierta oscila entre un pequeño porcentaje y casi un 40% al final del período de simulación. El análisis de vulnerabilidad, mostrado a continuación, exploró cómo estos patrones de demanda cambian bajo condiciones climáticas y de uso de tierra diferentes.

Figura 6. Demanda insatisfecha proyectada bajo la gama completa de futuros plausibles para nodos domésticos y de riego.



PASO 3) CARACTERIZAR LAS VULNERABILIDADES CLAVE

La calidad del desempeño del sistema de gestión de agua de Mendoza es altamente dependiente de las condiciones futuras a considerar. Esto sugiere que, a pesar de ser posible que el sistema se desempeñe satisfactoriamente en el futuro, también es verosímil que no lo haga. El paso de análisis de vulnerabilidades de un análisis RDM está diseñado para resaltar las partes del sistema que son vulnerables a experimentar bajo desempeño y las condiciones para esto. Esta información, posteriormente, puede usarse para desarrollar o comparar adaptaciones.

DEFINIENDO LAS VULNERBILIDADES DEL SISTEMA

Para ilustrar estas diferencias en el desempeño del sistema, el análisis se enfocó en la cantidad absoluta de demanda no satisfecha y el porcentaje de demanda que no se atiende en un nodo dado. Este doble enfoque para cuantificar la demanda insatisfecha reconoce dos factores: (1) la habilidad de un nodo dado de adaptarse a la escasez es proporcional al porcentaje de reducción del servicio y (2) las inversiones deben sopesarse en términos de sus beneficios absolutos.

Primero, el equipo definió y utilizó un conjunto de umbrales de desempeño para agregar el desempeño del sistema en cada nodo a lo largo del tiempo. El equipo promedió la demanda, la demanda insatisfecha, y el porcentaje de demanda no cubierta sobre tres temporadas: demanda máxima (octubre a febrero), demanda baja (mayo a julio), y demanda transicional (marzo-abril y agosto-septiembre); y sobre dos horizontes de tiempo: corto plazo (2021-2035) y largo plazo (2036-2050). Después se clasificaron los resultados para cada nodo usando los siguientes dos niveles:

- Rendimiento aceptable: demanda insatisfecha promedio debajo del 10 por ciento
- Bajo rendimiento: demanda insatisfecha promedio entre 10 y 20 por ciento

Para los nodos agrícolas se utilizaron dos niveles diferentes:

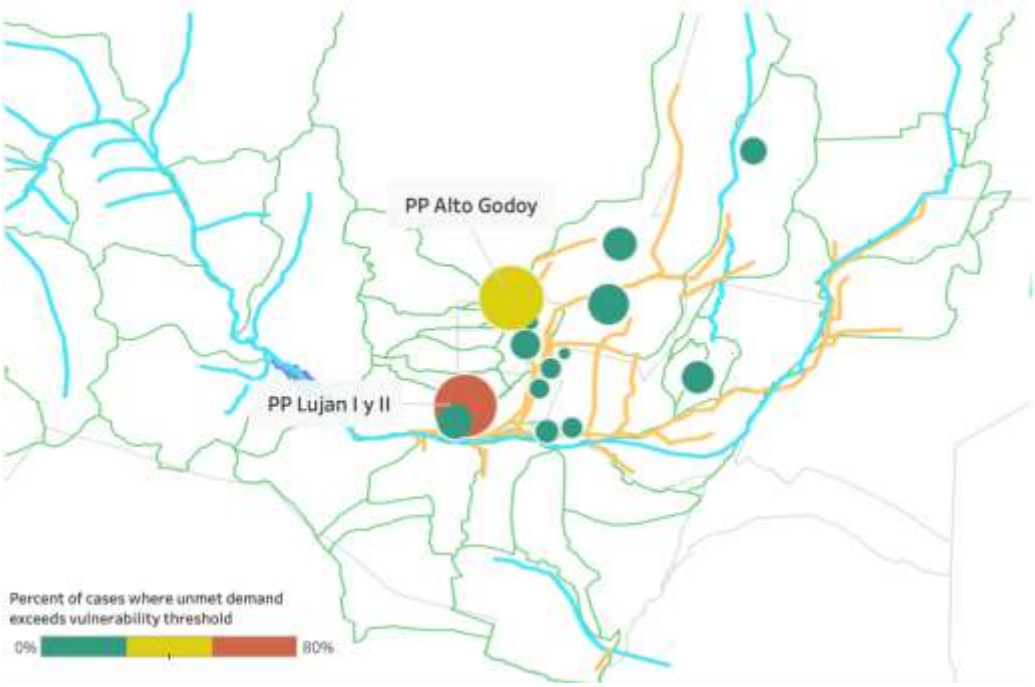
- Rendimiento aceptable: demanda insatisfecha promedio por debajo del 20 por ciento
- Bajo rendimiento: demanda insatisfecha promedio mayor al 20 por ciento

Estos umbrales se establecieron en colaboración con los administradores del agua de Mendoza.

Vulnerabilidades Urbanas

Debido a la prioridad del suministro de agua para el uso urbano del agua sobre el uso agrícola del agua, todas las zonas urbanas, salvo algunas, son completamente confiables en las simulaciones futuras. Las excepciones son dos áreas bastante grandes: PP Alto Godoy y PP Lujan I y II (Figura 7). En ambas áreas, hay algunos futuros en los que el rendimiento es aceptable y otros en los que es pobre. Los administradores de agua en Irrigación tienen preocupaciones de que el modelo no represente adecuadamente los suministros disponibles en estos nodos. Por lo tanto, no se continuó con el análisis de vulnerabilidad para los nodos urbanos.

Figura 7. Nodos de demanda doméstica, tamaño relativo a la demanda y color correspondiente a la vulnerabilidad

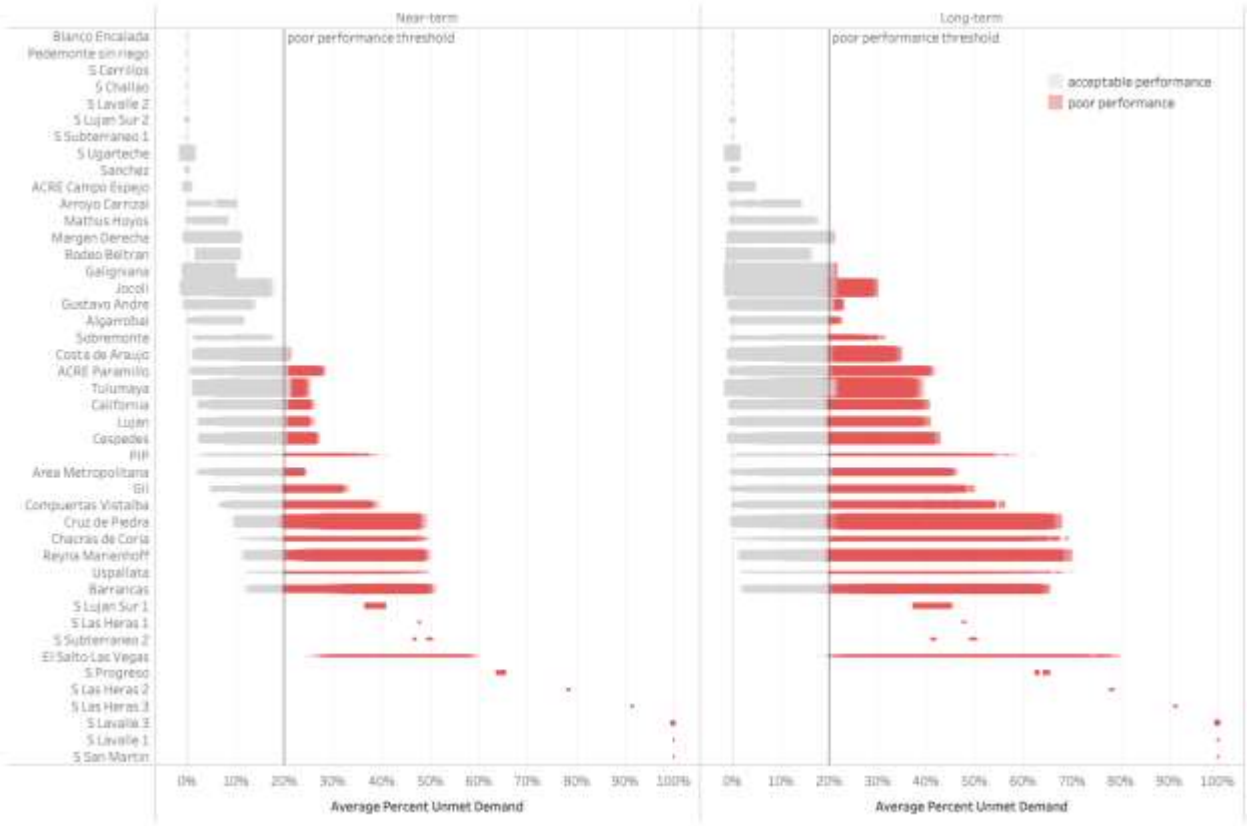


Nota: las líneas azules representan el Río Mendoza y afluentes, las líneas naranjas indican el sistema de transporte construido de canales, las líneas verdes delimitan las subcuencas.

Vulnerabilidades Agrícolas

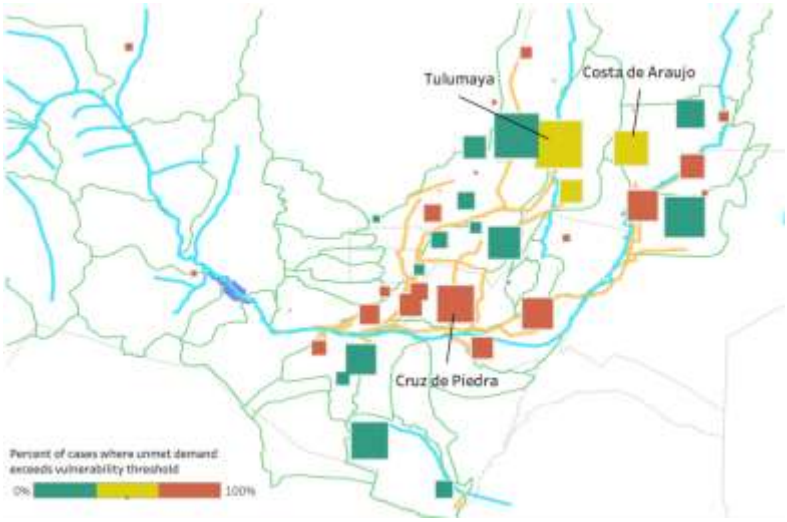
La oferta para satisfacer las demandas agrícolas es menor que para las demandas urbanas en la cuenca del río Mendoza. La Figura 8 muestra el rango de resultados modelados a corto y largo plazo en todos los futuros para cada nodo agrícola. La coloración indica los niveles de rendimiento para la demanda insatisfecha para la temporada de demanda máxima. El ancho de los símbolos es proporcional a la demanda promedio del nodo. Para aproximadamente una cuarta parte de los nodos, los resultados se modelan para que sean favorables en todos los futuros a corto plazo (todos los símbolos son verdes), los nodos enumerados en la parte superior de la Figura 8. También hay una serie de nodos que se modelan para tener demanda insatisfecha muy alta: nodos enumerados en la parte inferior de la Figura 8. Algunos de estos resultados se deben a restricciones en el modelo, tales como la capacidad de transporte o de bombeo, que no permiten que se utilice un suministro adecuado para satisfacer la demanda. Por ejemplo, S Lavalle 1, S Lavalle 3 y S San Martin. Los resultados para otros dependen de suposiciones sobre el futuro y son de particular interés para este estudio.

Figura 8. Rangos de desempeño a lo largo de las incertidumbres en el corto (near-term) y largo plazo (long-term) para los nodos de riego



La Figura 9 resume el desempeño del sistema en el sector agrícola de forma geográfica. Se destacan tres nodos: Tulumaya, Costa de Araujo y Cruz de Piedra, que se describen con más detalle a continuación para ilustrar el método de análisis de vulnerabilidad.

Figura 9. Nodos de demanda de riego, tamaño relativo a la demanda y color de acuerdo a la vulnerabilidad



Nota: Los nodos se colorean en función del porcentaje de casos en los que la demanda insatisfecha supera el umbral del 20 por ciento. Los resultados sombreados en verde tienen una alta demanda insatisfecha en menos del 33 por ciento de los casos. Los resultados sombreados en rojo tienen una alta demanda insatisfecha en más del 67 por ciento de los casos.

Las Figuras 10 a 12 muestran los mapas de vulnerabilidad a largo plazo para tres grandes regiones agrícolas que experimentarían escasez en muchos futuros plausibles: Tulumaya, Costa de Araujo y Cruz de Piedra. Los dos primeros son nodos de riego aguas abajo que exhiben una gran demanda insatisfecha en muchos, pero no en todos los futuros. Los mapas de vulnerabilidad muestran el rendimiento a largo plazo del sistema en las diferentes dimensiones de incertidumbre. Las columnas amplias indican el escenario de uso de la tierra asumido (ordenado por la cantidad de aumento en la tierra agrícola) y las filas amplias corresponden a los escenarios de variabilidad climática -la duración de la sequía más larga. La dimensión horizontal interior representa las tendencias de precipitación y la dimensión vertical interior representa las tendencias de temperatura. Los casos de interés, aquellos con bajo rendimiento, se indican con X rojas. Hay resultados de bajo rendimiento dispersos en los mapas de vulnerabilidad de Tulumaya y Costa de Araujo, lo que sugiere que las tres dimensiones de incertidumbre juegan un papel en la vulnerabilidad en estos nodos de riego. Para Cruz de Piedra, la demanda insatisfecha excede el umbral de vulnerabilidad en todos los futuros excepto en algunos (Figura 12).

Figura 10. Mapa de vulnerabilidad para el nodo de riego de Tulumaya

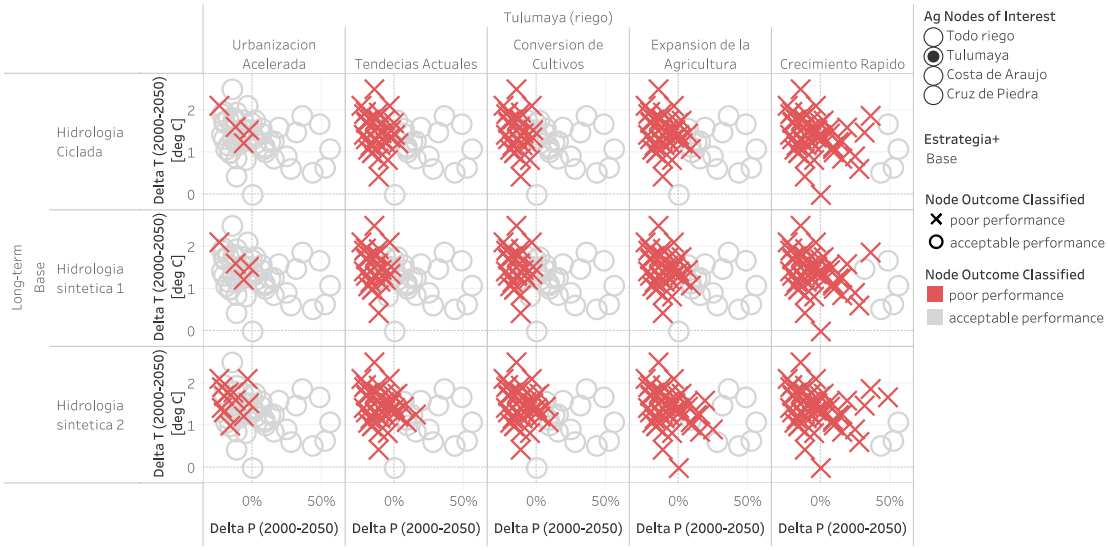


Figura 11. Mapa de vulnerabilidad del nodo de riego Costa de Araujo

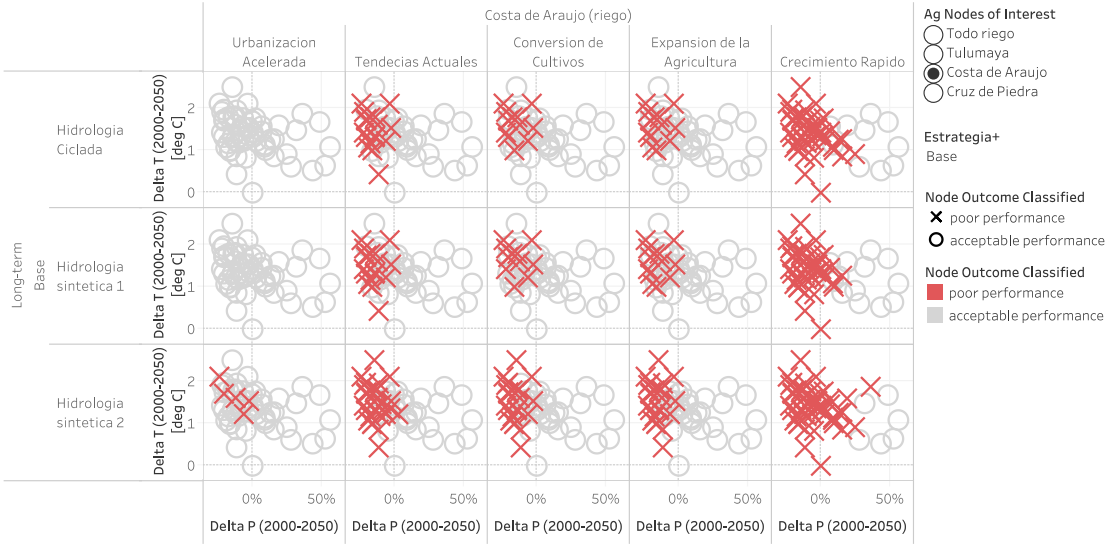
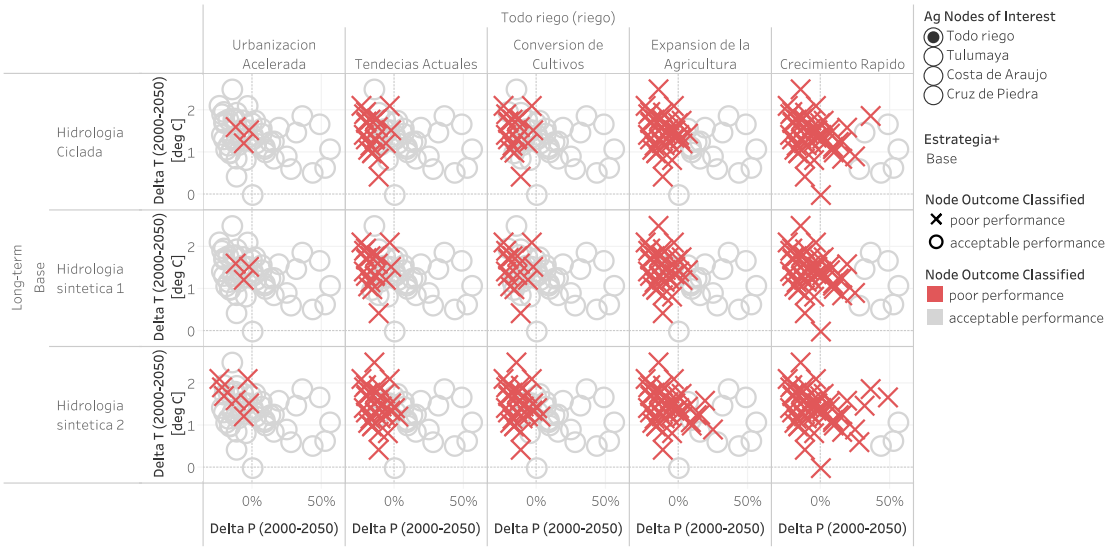


Figura 12. Mapa de vulnerabilidad para el nodo de riego Cruz de Piedra

La Figura 13 muestra el mapa de vulnerabilidad para todos los nodos de riego en conjunto, que refleja los patrones de vulnerabilidad para Tulumaya y Cruz de Piedra. El equipo utilizó el rendimiento en todas las áreas irrigadas para comparar las estrategias de mitigación a continuación.

Figura 13. Mapa de vulnerabilidad para todos los nodos de riego



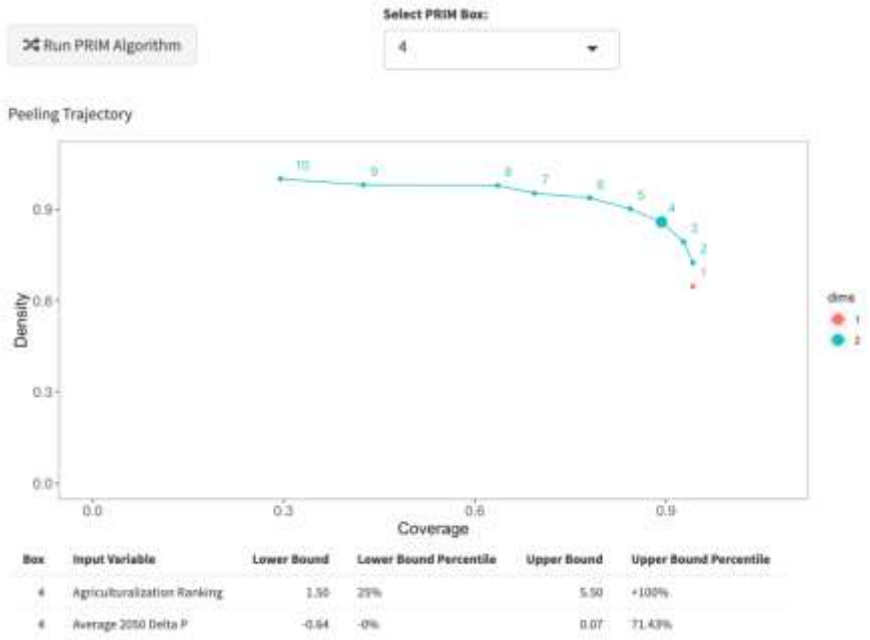
Usando las herramientas de "descubrimiento de escenarios" de RDM, se pueden definir aún más las condiciones que conducen a un bajo rendimiento. Estas herramientas, incluyendo el algoritmo PRIM, se utilizan para (1) identificar qué incertidumbres o caracterizaciones de la incertidumbre son las más importantes para determinar las condiciones futuras a las que un sistema es vulnerable y (2) definir un conjunto conciso de reglas que describen el rango de incertidumbre. Con el metodo PRIM, los conjuntos de futuros están definidos por rangos de valores de incertidumbre y, por lo tanto, definen "cajas"

multidimensionales dentro del espacio de incertidumbre. PRIM identifica cajas de escenarios futuross que equilibran la densidad (el porcentaje de casos que son de interés dentro del cuadro) y la cobertura (el porcentaje de todos los casos de interés que están dentro del cuadro). Una "caja" ideal incluiría todos los casos de interés y ningún caso que no sea de interés, con una densidad del 100 por ciento y una cobertura del 100 por ciento. En la práctica, a menudo hay múltiples regiones en el espacio de incertidumbre que conducen a malos resultados y, por lo general, no siempre se componen completamente de malos resultados. Por lo tanto, el descubrimiento de escenarios incluye subjetividad por parte del analista y es iterativo. Adicionalmente, el analista tiene el trabajo de seleccionar r cajas identificadas por PRIM que sean de fácil interpretación para los tomadores de decision.En general, cuanto menor sea el número de incertidumbres utilizadas, mayor será el grado de interpretabilidad. Para este estudio, se desarrolló una herramienta PRIM personalizada para mostrar interactivamente las estadísticas de cada cuadro en la trayectoria de pelado y también una visualización de los resultados y el "cuadro" definido.

Para Tulumaya, el algoritmo PRIM se utilizó para identificar tres escenarios vulnerables:

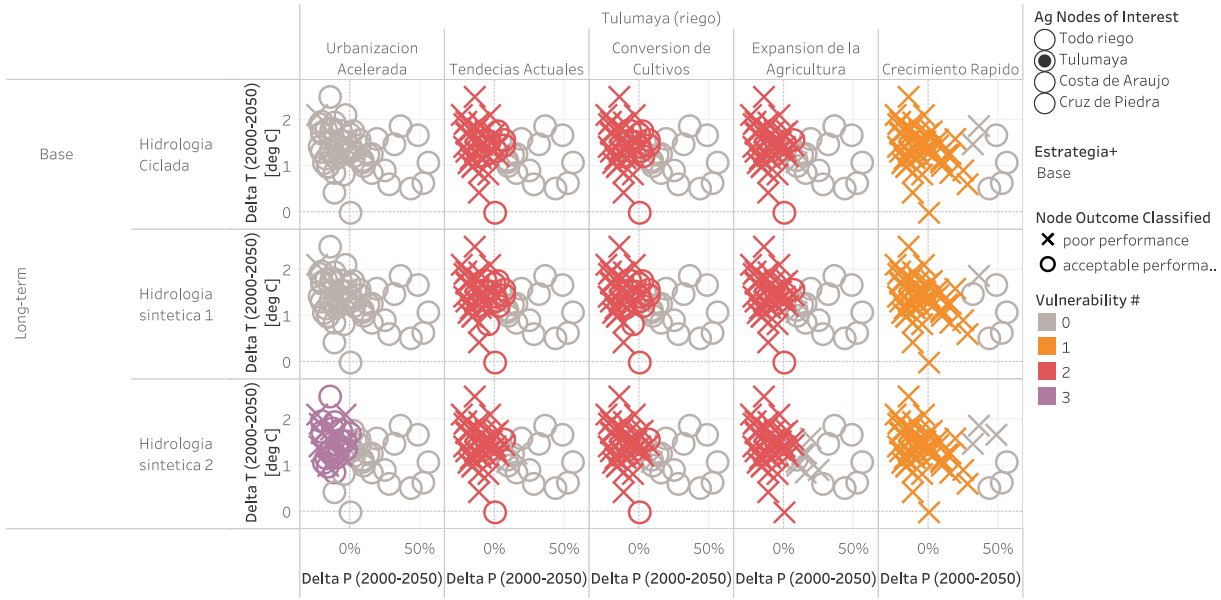
- 1) Escenario de crecimiento rápido / No extremadamente húmedo: El primer escenario de vulnerabilidad incluye futuros para los cuales las condiciones de uso de la tierra están restringidas al escenario de Crecimiento Rápido y las tendencias de precipitación son menores a + 30%.
- 2) Urbanización esperada / Condiciones medias o secas: El segundo escenario de vulnerabilidad se define con base en la "trayectoria de pelado" de los cuadros a lo largo de la frontera de cobertura y densidad que se muestra en la Figura 14. El cuadro 1 es un cuadro de una sola dimensión, simplemente restringiendo el escenario de uso de la tierra a todos excepto a Urbanización Acelerada (Crecimiento Rápido fue eliminado, ya que está cubierto principalmente por la primera vulnerabilidad). La densidad de este cuadro es del 65 por ciento y la cobertura es del 94 por ciento. Los recuadros 2 a 11 aumentan sucesivamente la densidad a expensas de la cobertura al restringir los futuros a aquellos con tendencias de precipitación cada vez más negativas. El Recuadro 4 seleccionado limita los aumentos de precipitación a menos del + 7 por ciento y tiene una densidad del 86 por ciento e incluye el 89 por ciento de los casos de resultados pobres restantes, una caracterización futura útil.
- 3) Urbanización acelerada / Condiciones secas y de calentamiento: El tercer escenario de vulnerabilidad describe los malos resultados restantes bajo el escenario de Urbanización Acelerada. Bajo este escenario de uso de la tierra, solo se incluyen los futuros con la sequía extendida (+ 2 años), las tendencias negativas de precipitación y tendencias de temperatura mayores que +0.84 grados centígrados están incluidas.

Figura 14. Trayectoria de *Peeling* para el análisis PRIM del nodo de riego de Tulumaya



La Figura 15 muestra nuevamente el mapa de vulnerabilidad para el nodo de riego de Tulumaya, pero esta vez colorea los resultados para mostrar los tres cuadros identificados por PRIM. Este gráfico muestra que estas tres escenarios vulnerables incluyen casi todos los resultados de bajo rendimiento (las X) y pocos resultados de rendimiento aceptables (el Os).

Figura 15. Escenarios de vulnerabilidad para el nodo de riego de Tulumaya



Este mismo proceso de descubrimiento de escenarios se utilizó para identificar escenario de vulnerabilid para los otros dos nodos y los resultados de riego agregados, resumidos en la Tabla 2. Tulumaya, Costa de

Araujo y los nodos agregados de riego total son todos muy vulnerables en el escenario de crecimiento rápido, indicando que suministro o eficiencia adicionales deberán ser respaldados. Para los escenarios de crecimiento moderado del uso de suelo, estos nodos también son particularmente sensibles a las tendencias de precipitación; las tendencias negativas conducirían a un desempeño pobre o muy pobre a largo plazo. Para el escenario de uso de suelo menos estresante -la urbanización acelerada-, el enfoque de gestión actual es vulnerable cuando las sequías son más largas de lo que se ha experimentado en el registro histórico reciente y prevalecen las tendencias de períodos secos y de aumento de temperatura.

El nodo Cruz de Piedra es vulnerable en todas las condiciones.

Tabla 2. Definiciones de vulnerabilidad y estadísticas para tres nodos agrícolas, más el agregado de todos los nodos de irrigación

Nodo de Irrigación	Escenario de vulnerabilidad	Definición	Densidad	Cobertura
Tulumaya	1) Escenario de crecimiento rápido / No extremadamente húmedo	Escenario de uso de suelo *Crecimiento Rápido* Tendencia de precipitaciones <= +30%	100%	30%
	2) Urbanización esperada / Condiciones medias o secas	Escenarios de uso de suelo, excepto *Crecimiento Rápido* y *Urbanización Acelerada* Tendencia de precipitaciones <= +7%	85%	63%
	3) Urbanización acelerada / Condiciones secas y de calentamiento	Escenario de uso de suelo *Urbanización Acelerada* Duración de la sequía + 2 años adicionales Tendencia de precipitaciones <= 0% Tendencia de temperatura => +0.84	38%	2%
Costa de Araujo	1) Escenario de crecimiento rápido / No extremadamente húmedo	Escenario de uso de suelo *Crecimiento Rápido* Tendencia de precipitaciones <= +13%	96%	43%
	2) Urbanización esperada / Condiciones medias o secas	Escenarios de uso de suelo, excepto *Crecimiento Rápido* y *Urbanización Acelerada* Tendencia de precipitaciones <= +0%	51%	52%
	3) Urbanización acelerada / Condiciones secas y de calentamiento	Escenario de uso de suelo *Urbanización Acelerada* Duración de la sequía + 2 años adicionales Tendencia de precipitaciones <= 0% Tendencia de temperatura => +1.2	20%	2%
Cruz de Piedra	1) Todos los futuros	Todos los futuros	99%	100%
Todos los nodos de	1) Escenario de crecimiento	Escenario de uso de suelo *Crecimiento Rápido* Tendencia de precipitaciones <= +30%	99%	35%

Irrigación (agregado)	rápido / No extremadamente húmedo			
	2) Urbanización esperada / Condiciones medias o secas	Escenarios de uso de suelo, excepto *Crecimiento Rápido* y *Urbanización Acelerada* Tendencia de precipitaciones <= +7%	69%	60%
	3) Urbanización acelerada / Condiciones secas y de calentamiento	Escenario de uso de suelo *Urbanización Acelerada* Duración de la sequía + 2 años adicionales Tendencia de precipitaciones <= 0% Tendencia de temperatura => +1.22	28%	2%

Paso 4) Evaluar Beneficios y Propuestas de Costo de Infraestructura

El análisis de vulnerabilidad sugiere que la demanda insatisfecha durante los meses de mayor uso del agua aumentaría en muchos, pero no en todos, los futuros plausibles en el sector agrícola. Informado por las discusiones con los gerentes de recursos hídricos de Mendoza, el equipo de investigación definió y modeló tres opciones de gestión diferentes:

- Reservorio grande único: nuevo reservorio en Río Mendoza cerca de Uspallata con capacidad de 862 hm^3, de los cuales 757 hm^3 son utilizables -una simplificación de *Alternativa 2a* de documentos de planificación de Mendoza.[5]
- Conjunto de embalses más pequeños: adición de varios (alrededor de 10-20) embalses más pequeños (entre 200 km^3 y 1 hm^3) ubicados estratégicamente en canales de riego para reducir la demanda insatisfecha en los nodos de riego clave identificados mediante el análisis de vulnerabilidad- llamados *Embalses Pequeños*.
- Riego presurizado: representado por un aumento en la eficiencia del riego para simular la conversión del riego de las técnicas de inundación a goteo por un porcentaje diferente en cada nodo. Los porcentajes representan el porcentaje de la superficie por nodo que usa el riego presurizado. El estudio consideró un uso del 20, 50 y 80 por ciento - llamado *Incremento de Riego Presurizado.* Es importante señalar que este estudio no consideró las necesidades energéticas de los aumentos en el riego presurizado y solo se centró en las reducciones de la demanda de agua.

Estas opciones se agruparon en varias estrategias diferentes, y se desarrollaron estimaciones de costos simples, como se muestra en la Tabla 3. La estrategia menos costosa es *Embalses Pequeños*, con un

[5] La alternativa 2a requiere tres reservorios de tamaño moderado (Tupungato Superior, Punta de Vacas y Uspallata) y un pequeño reservorio (Punta Vacas). Los cuatro embalses están diseñados principalmente para energía hidroeléctrica, pero también podrían tener beneficios de suministro de agua. Simplificamos esta estrategia modelando un solo depósito grande. Una extensión de este análisis podría modelar el llenado del reservorio por un tiempo mas largo, específicamente para mas de un ciclo hidrológico. Este escenario ayudaría a reducir las consecuencias del llenado sobre la disponibilidad del agua en las zonas productivas.

modesto monto de $ 27 millones.[6] La estrategia más costosa —*Incremento de Riego Presurizado + 80% + Alternativa 2a*— incluye el costo del reservorio grande único ($ 3,385 M) más $ 85-89M adicionales para convertir el 80 por ciento de la tierra regada a técnicas presurizadas.[7]

Tabla 3. Costos asumidos para cada estrategia evaluada

Estrategia	Costos de capital para el reservorio ($M)	Conversión de áreas a irrigación presurizada (por hectárea)	Costos de la irrigación presurizada ($M)[c]	Costo total de la estrategia ($M)
Alternativa 2a	3,385	n/a	n/a	3,385
Embalses Pequeños	27	n/a	n/a	27
Incremento de Riego Presurizado +20%	n/a	21,143[a] – 22,284[b]	106 - 111	106 – 111
Incremento de Riego Presurizado +20% + Alternativa 2ª	3,385			3,491 – 3,496
Incremento de Riego Presurizado +20% + Embalses Pequeños	27			133 – 138
Incremento de Riego Presurizado +50%	n/a	52,857[a] – 55,710[b]	265 - 279	265 – 279
Incremento de Riego Presurizado +50% + Alternativa 2ª	3,385			3,650 – 3,664
Incremento de Riego Presurizado +50% + Embalses Pequeños	27			292 – 306
Incremento de Riego Presurizado +80%	n/a	84,571[a] – 89,136[b]	423 – 446	423 – 446
Incremento de Riego Presurizado +80% + Alternativa 2ª	3,385			3,808 – 3,831
Incremento de Riego Presurizado +80% + Embalses Pequeños	27			450 – 473

[a] Corresponde al escenario de uso de suelo *Urbanización Acelerada*.

[b] Corresponde al escenario de uso de suelo *Crecimiento Rápido*.

[c] Basado en un costo de conversión de $5,000/hectárea.

[6] Esta estimación de costos se basa en una suposición simple de que el costo por capacidad para estos depósitos pequeños sería igual al costo por capacidad de los depósitos grandes: $ 4.47 / metro cúbico. El análisis a continuación muestra que los efectos de estos depósitos son insignificantes, por lo que no se necesita una estimación de costos más refinada para este análisis.

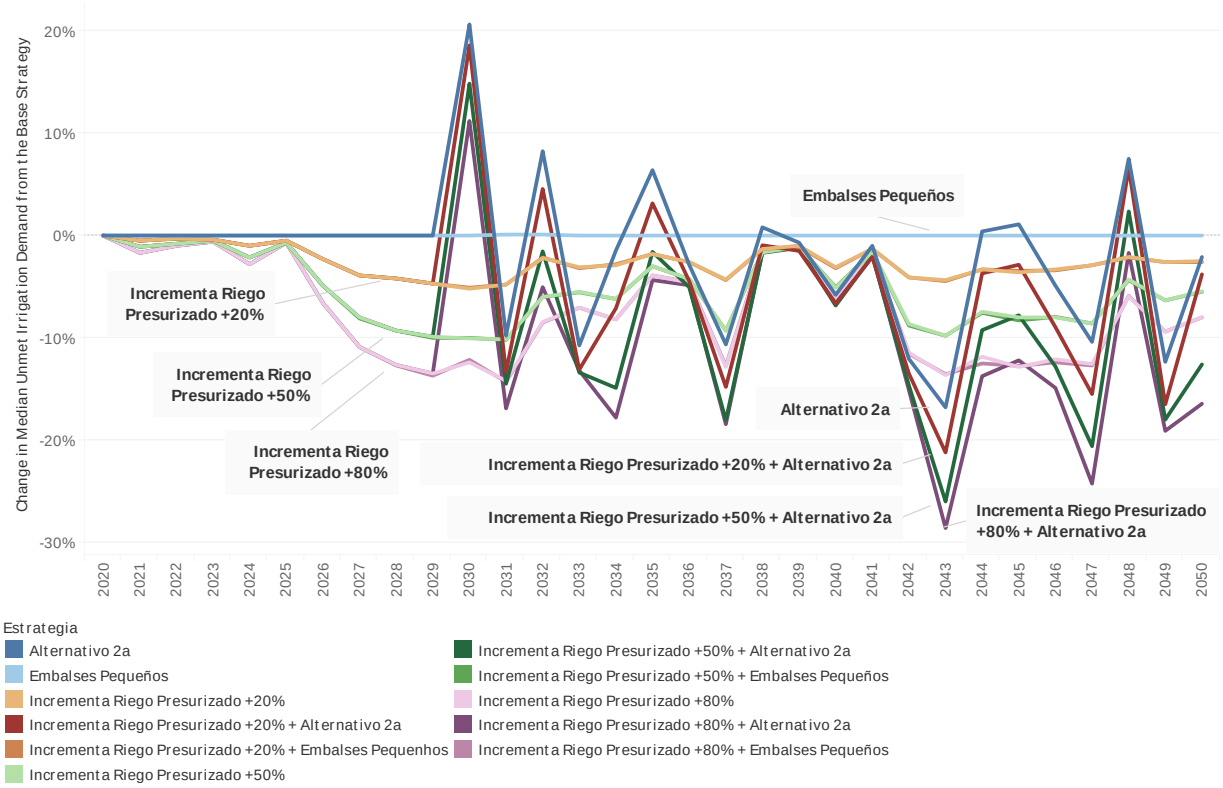
[7] El costo exacto de las estrategias de riego varía según los escenarios de uso de suelo debido a la extensión proyectada del área de tierra regada. Los costos para el escenario de riego más expansivo, *Crecimiento Rápido*, son aproximadamente un 20 por ciento más altos que para el escenario de riego menos expansivo: *Urbanización Acelerada.*

Luego, se evaluaron estas estrategias en todos los futuros para evaluar qué tan bien reducirían las vulnerabilidades y, en el proceso, aumentarían la resiliencia al clima y a los cambios en el uso de suelo. La Figura 16 muestra cómo la demanda de riego no satisfecha cambiaría con el tiempo en respuesta a la implementación de las diferentes estrategias. Para todas las estrategias que incluyen Alternativa 2a (el reservorio grande único), el cambio en la demanda insatisfecha oscila a medida que el reservorio se llena y se vacía para satisfacer la demanda futura. Este comportamiento es el resultado de un sistema que no tiene una cantidad significativa de agua no utilizada, incluso durante la estación húmeda y años húmedos, para llenar o volver a llenar un reservorio grande rápidamente. El reservorio podría ser operado para tener un impacto más consistente, pero entonces probablemente no se llenaría completamente y esto reduciría su capacidad de generar energía hidroeléctrica. En este estudio solamente se consideraron los beneficios de la construcción de una represa grande en Uspallata con respecto a la disminución en la demanda insatisfecha. En realidad, hay otros beneficios como, por ejemplo, la provisión de energía hidroeléctrica, la reducción en la tasa de sedimentación en el dique Potrerillos y la disminución del riesgo hidrológico. Debido al alcance de este estudio, no fue posible considerar estos beneficios. Una extensión del estudio lograría considerar estos beneficios.

Otro hallazgo clave de la Figura 16 es el efecto mínimo que las estrategias de Embalses Pequeños tendrían sobre la demanda insatisfecha, prácticamente indistinguible de otras estrategias que excluyen esta opción. Al mismo tiempo, es importante notar que en realidad estos reservorios tienen una regulación de 10 y 20 días, pero el intervalo de tiempo del modelo WEAP desarrollado por DGI es mensual. Esta diferencia en el intervalo de tiempo modelado implica que no es posible capturar las mejoras en la disponibilidad de agua que introducen los embalses pequeños durante periodos de tiempo mas cortos. También, estos embalses permiten a los productores la posibilidad de construir reservorios más pequeños dentro de las propiedades, efectivamente mejorando la flexibilización de la distribución secundaria y aumentando la frecuencia de riego. El modelo WEAP desarollado por DGI no considera la red secundaria de distribución.. Se puede fortalecer este analísis en el futuro analizando un intervalo de tiempo menor al mensual, pre-establecidio por el modelo WEAP, y con la adición de la red secundaria.

Finalmente, el análisis muestra que todas las estrategias que aumentan el riego a presión tienen un efecto notable en la reducción de la demanda insatisfecha, tanto por sí solas (por ejemplo, Incremento de Riego Presurizado + 20%, + 50% y + 80%) y en combinación con Alternativa 2a.

Figura 16. Cambio en la demanda de riego no satisfecha de la Estrategia Base a lo largo del tiempo para una variedad de estrategias



La siguiente sección describe un enfoque simple para comparar los costos y las mejoras de rendimiento para cada estrategia.

Paso 5) Deliberar entre la Robustez y Compensación de Costos

Una medida útil de robustez y mejoras de robustez debidas a estrategias alternativas es el porcentaje de casos aceptables (o inaceptables) para cada una de las tres vulnerabilidades identificadas en el Paso 3, en este caso, para toda la región agrícola. La Tabla 4 resume el porcentaje de casos que son aceptables e inaceptables para las tres vulnerabilidades descritas en la Tabla 2 (arriba) para cada estrategia. Los resultados para la estrategia Base coinciden con las estadísticas que se muestran en la Tabla 2. Para la primera vulnerabilidad, el porcentaje de resultados inaceptables disminuye del 99 por ciento, para la estrategia Base al 0 por ciento y para la estrategia Incremento de Riego Presurizado + 80% + Alternativa 2a. Sin embargo, es importante tener en cuenta que solo el 5 por ciento de los resultados son inaceptables con una presurización del 80% y sin un reservorio como el de la Alternativa 2a. La robustez también aumenta dramáticamente para las vulnerabilidades 2 y 3. Para estas vulnerabilidades, se requiere menos intervención para eliminar los malos resultados.

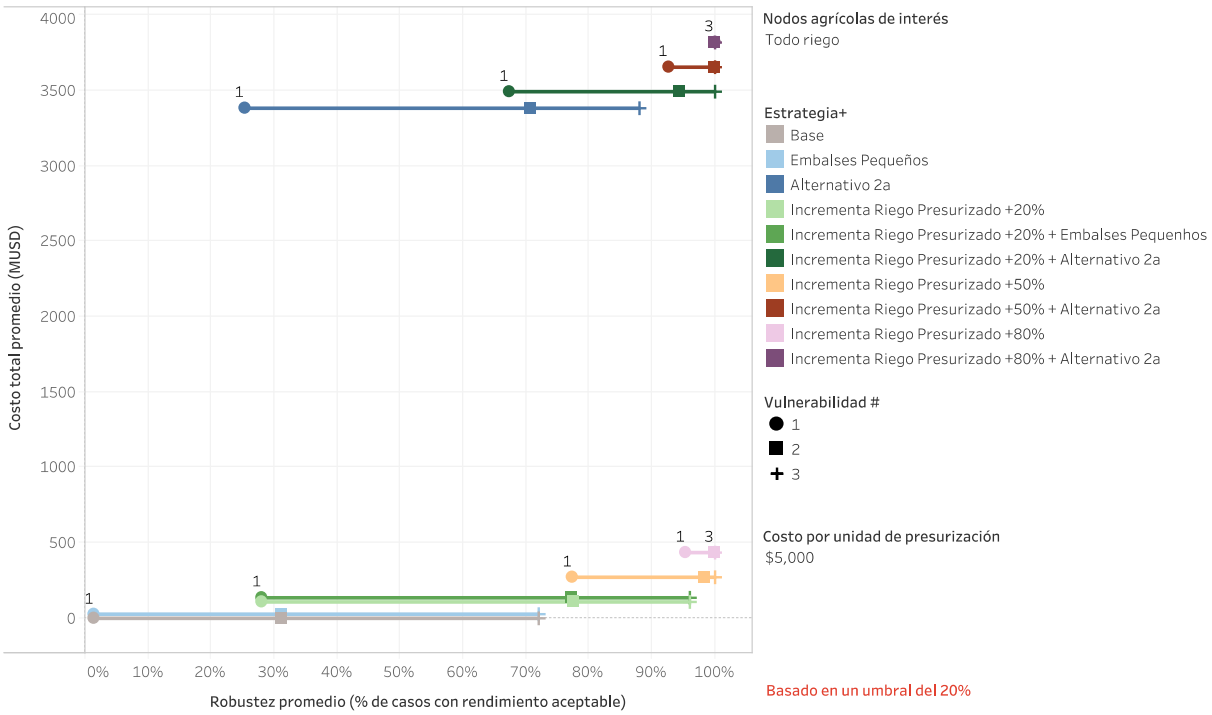
Tabla 4. Medidas de robustez para las tres vulnerabilidades para el sector de riego en todas las estrategias

Vulnerabilidad	Estrategia+	Todo riego	
		rendimiento aceptable	unacceptable performance
1: Escenario de uso de suelo Crecimiento Rápido; Tendencia de precipitaciones <= +30%	Base	1%	99%
	Embalses Pequenhos	1%	99%
	Alternativo 2a	25%	75%
	Incrementa Riego Presurizado +20%	28%	72%
	Incrementa Riego Presurizado +20% + Embalses Pequeños	28%	72%
	Incrementa Riego Presurizado +20% + Alternativo 2a	67%	33%
	Incrementa Riego Presurizado +50%	77%	23%
	Incrementa Riego Presurizado +50% + Embalses Pequeños	76%	24%
	Incrementa Riego Presurizado +50% + Alternativo 2a	93%	7%
	Incrementa Riego Presurizado +80%	95%	5%
	Incrementa Riego Presurizado +80% + Embalses Pequeños	95%	5%
	Incrementa Riego Presurizado +80% + Alternativo 2a	100%	
2: Escenarios de uso de suelo, excepto Crecimiento Rápido y Urbanización Acelerada; Tendencia de precipitaciones <= +7%	Base	31%	69%
	Embalses Pequenhos	31%	69%
	Alternativo 2a	71%	29%
	Incrementa Riego Presurizado +20%	78%	22%
	Incrementa Riego Presurizado +20% + Embalses Pequeños	77%	23%
	Incrementa Riego Presurizado +20% + Alternativo 2a	94%	6%
	Incrementa Riego Presurizado +50%	98%	2%
	Incrementa Riego Presurizado +50% + Embalses Pequeños	98%	2%
	Incrementa Riego Presurizado +50% + Alternativo 2a	100%	
	Incrementa Riego Presurizado +80%	100%	
	Incrementa Riego Presurizado +80% + Embalses Pequeños	100%	
	Incrementa Riego Presurizado +80% + Alternativo 2a	100%	
3: Escenario de uso de suelo Urbanización Acelerada; Duración de la sequía + 2 años adicionales; Tendencia de precipitaciones <= 0%; Tendencia de temperatura => +1.22	Base	72%	28%
	Embalses Pequenhos	72%	28%
	Alternativo 2a	88%	12%
	Incrementa Riego Presurizado +20%	96%	4%
	Incrementa Riego Presurizado +20% + Embalses Pequeños	96%	4%
	Incrementa Riego Presurizado +20% + Alternativo 2a	100%	
	Incrementa Riego Presurizado +50%	100%	
	Incrementa Riego Presurizado +50% + Embalses Pequeños	100%	
	Incrementa Riego Presurizado +50% + Alternativo 2a	100%	
	Incrementa Riego Presurizado +80%	100%	
	Incrementa Riego Presurizado +80% + Embalses Pequeños	100%	
	Incrementa Riego Presurizado +80% + Alternativo 2a	100%	

Por último, el equipo combinó la información presentada en la Tabla 4 con las estimaciones de costos de la Tabla 3 para mostrar las compensaciones en la reducción de robustez y los costos (Figura 17). El porcentaje de casos con un rendimiento aceptable en las condiciones de las tres vulnerabilidades se muestra a lo largo del eje horizontal. El eje vertical representa el costo aproximado para una estrategia dada. La estrategia base, por ejemplo, no tiene costos adicionales, y muy baja robustez en la primera vulnerabilidad (1%), baja robustez en la segunda vulnerabilidad (31%) y moderadamente alta robustez en la tercera vulnerabilidad (72%). Las estrategias más favorables serían aquellas que mejoren la robustez en las tres vulnerabilidades al menor costo. Como se ve en la figura, la siguiente estrategia menos costosa que reduce la robustez es la estrategia Incremento de Riego Presurizado + 20%, que significa que el 20 por ciento de la superficie de la unidad de manejo esta presurizada. Continuando con la frontera de robustez de costos está la estrategia Incremento de Riego Presurizado + 50%. Esta estrategia elimina la segunda y tercera vulnerabilidades y aumenta el porcentaje de resultados favorables en la primera vulnerabilidad al 77 por ciento. La estrategia que también agrega el reservorio Alternativa 2b mejora la robustez de la primera vulnerabilidad, pero lo hace a un costo extremadamente alto (más $ 3,385 M), y por lo tanto no

está en la frontera. La última estrategia en la frontera es el Incremento de Riego Presurizado + 80%, que aumenta la robustez a la primera vulnerabilidad al 95 por ciento. Esto se logra a un costo total de $ 423 - 446 millones.

Figura 17. Disyuntivas Entre el Costo y Robustez del las Estrategias



La Figura 17 sugiere que la decisión principal que enfrenta Mendoza con respecto a la reducción de la demanda insatisfecha futura esperada en la amplia gama de futuros plausibles, es la cantidad de área regada para convertir a sistemas presurizados. Basado en este análisis, el reservorio no es justificable para mejorar la confiabilidad del suministro.

Para ayudar a la toma de decisiones con respecto a esta elección, la Figura 18 muestra nuevamente el mapa de vulnerabilidad, pero destaca los casos en los que la estrategia Incremento de Riego Presurizado + 50% cambia el rendimiento de inaceptable a aceptable. La Figura 19 complementa la Figura 18 al resaltar los casos restantes en los que el rendimiento es deficiente.[8] Como se puede ver en las figuras, la estrategia Incremento de Riego Presurizado + 50% proporciona una mejora significativa del rendimiento en los escenarios de uso moderado de suelo y en algunos casos para el escenario de uso de suelo “Crecimiento Rápido” (para aquellos en los que aumenta la precipitación). Esto sugiere que solo estaría justificado presurizar el riego más allá del 50 por ciento, debería estar buscando protegerse contra futuros más extremos -aquellos en los que las precipitaciones disminuyen y las áreas irrigadas aumentan significativamente, según lo previsto en el escenario de uso de suelo “Crecimiento Rápido” .

[8] En las dos figuras un rendimiento acceptable significa demanda insatisfecha promedio por debajo del 20 por ciento y un bajo rendimiento significa demanda insatisfecha promedio mayor al 20 por ciento.

Figura 18. Cambio en el rendimiento de los futuros para la estrategia *Incremento de Riego Presurizado* + 50%

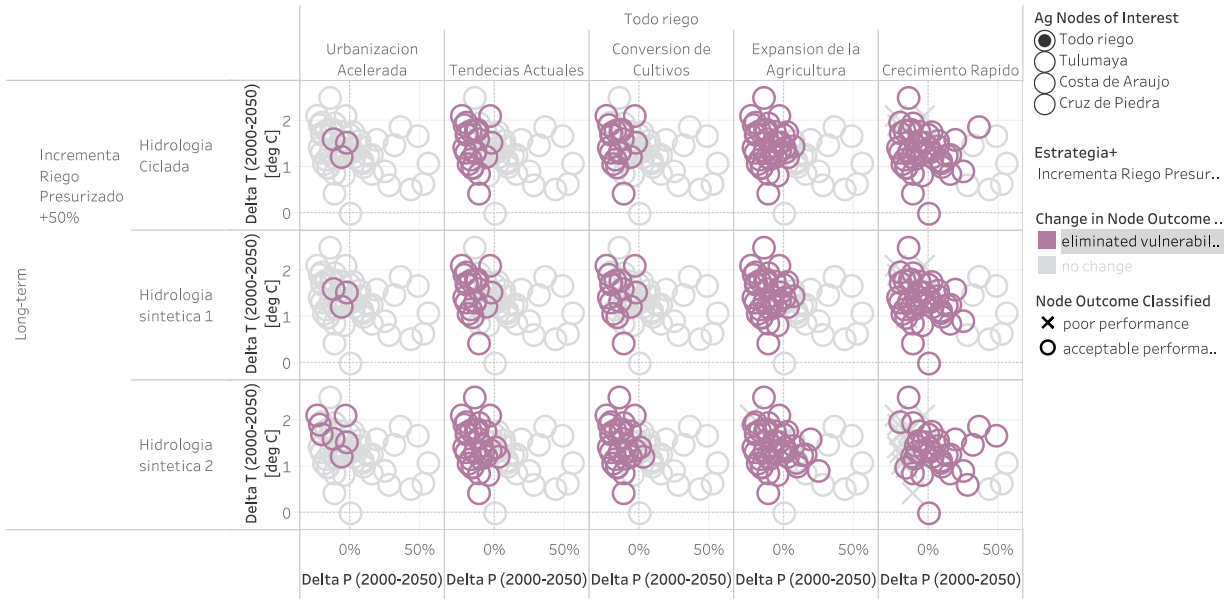
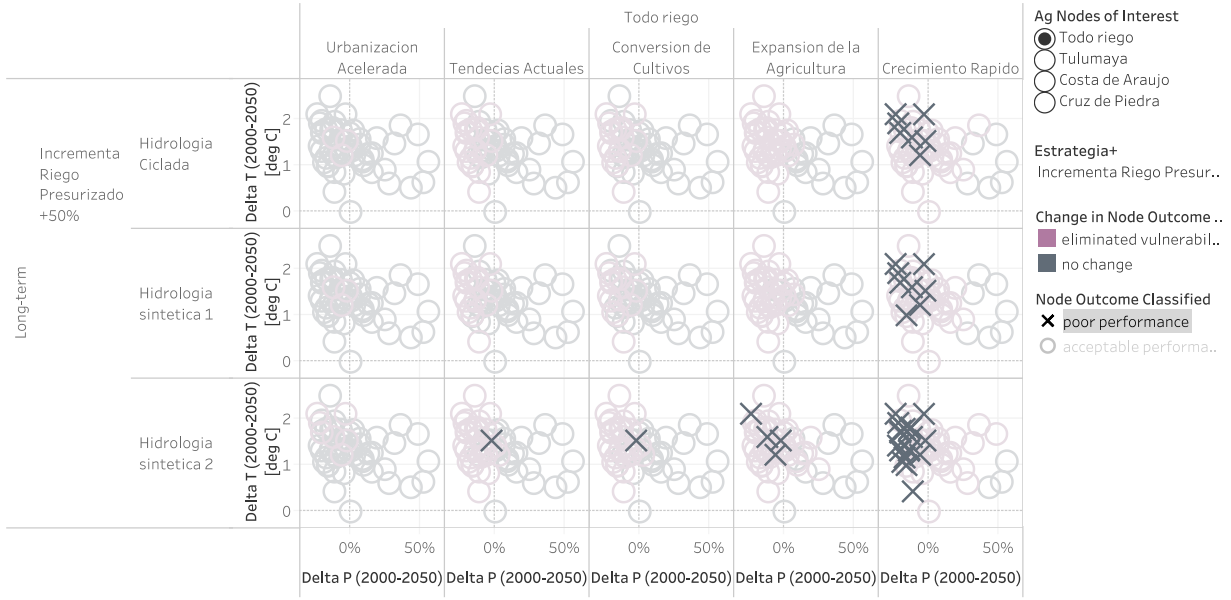


Figura 19. Casos de bajo rendimiento restantes para la estrategia *Incremento de Riego Presurizado* + 50%



CONCLUSIÓN

Este informe describe un enfoque basado en RDM para evaluar la vulnerabilidad y las oportunidades de adaptación para la gestión de los recursos hídricos, y lo ilustra con un estudio de caso para la región de Mendoza, Argentina. El RDM demuestra ser un método útil para el proceso de planificación de largo plazo de recursos hídricos, pues ayuda a tener en cuenta incertidumbres difíciles de entender y analizar. Además, el modelo provee información sobre las disyuntivas que se presentan al elegir entre diferentes opciones de política pública.

El análisis confirma la opinión predominante de que el sistema actual de agua de Mendoza es vulnerable a los cambios en el uso de suelo y al cambio climático. Esto se determinó evaluando cómo funcionaría el sistema de gestión actual del agua de Mendoza en casi 900 futuros plausibles diferentes; cada futuro reflejando un supuesto diferente sobre las tendencias climáticas, variabilidad climática y cambios en el uso del suelo. La revisión de los resultados de la simulación mostró que la demanda insatisfecha crece significativamente durante los períodos de sequía y también exhibe un aumento general con el tiempo.

La gran mayoría de la demanda insatisfecha se produce en el sector agrícola, con una pequeña cantidad en unos pocos nodos residenciales. Sin embargo, una preocupación del Departamento General de Irrigación es que el actual modelo del sistema puede necesitar mejoras adicionales para capturar completamente las operaciones y asignaciones al sector urbano, por lo que estas incertidumbres no fueron exploradas con más detalle. En el sector agrícola, los resultados muestran carencias plausibles que aumentan significativamente con el tiempo, superando el 35 por ciento en algunos años y futuros para todo el sector.

Se observan variaciones significativas de escasez proyectada entre sectores agrícolas, y con diferentes supuestos climáticos y usos de suelo. Por esto, se realizó un análisis de vulnerabilidad para comprender en qué condiciones el sistema no presentaría un desempeño deseado. Para ello, se definieron umbrales de desempeño para la demanda urbana y para la demanda agrícola para tres temporadas, en el largo y corto plazo. Luego, se clasificó el desempeño del sistema para cada futuro usando estos umbrales. Se realizó un análisis de vulnerabilidad detallado en dos grandes localidades agrícolas — Tulumaya y Costa de Araujo — y el sector agrícola en su conjunto. Estas dos ubicaciones son áreas de riego aguas abajo que exhiben una alta demanda insatisfecha en muchos, pero no en todos los futuros.

Usando herramientas de RDM, se identificaron tres condiciones generales que conducirían a una alta demanda insatisfecha en estas ubicaciones y en el sector en su conjunto:

1. Escenario de crecimiento rápido / No extremadamente húmedo
2. Urbanización esperada / Condiciones medias o secas
3. Urbanización acelerada / Condiciones secas y de calentamiento

A partir de este análisis, se exploró en detalle cómo el uso del suelo y el clima interactúan juntos para tensar potencialmente el sector agrícola. Con base en esta información, y en consulta con Irrigación, se evaluaron diferentes estrategias para reducir estas vulnerabilidades: un reservorio grande, una serie de reservorios más pequeños, e inversiones en riego presurizado. Estas tres opciones han sido evaluadas con anterioridad en la cuenca de Mendoza de diferentes maneras, pero este análisis representa el primer ejercicio de

comparación entre ellas, y en una amplia gama de futuros plausibles que reflejan las incertidumbres climáticas y de uso del suelo.

El aumento del almacenamiento en superficie, ya sea a través de uno o unos pocos reservorios grandes o una red de reservorios más pequeños, no mitigaría significativamente estas vulnerabilidades y sería extremadamente costoso. Las simulaciones mostraron que en muchos futuros plausibles no hay suficiente agua en exceso disponible durante las temporadas o años de lluvias. Sin este exceso de agua, los reservorios no pueden capturar y almacenar agua para futuros períodos de sequía sin causar también escasez.

Las inversiones en riego presurizado podrían reducir las vulnerabilidades de manera más significativa. El análisis encuentra que presurizar aproximadamente la mitad del área irrigada reduciría significativamente las tres vulnerabilidades. El análisis de disyuntivas muestra que las reducciones modestas en la demanda insatisfecha de las opciones de almacenamiento en superficie justifican los costos, particularmente cuando se comparan con los costos y beneficios del riego presurizado. También, es importante notar que las inversiones en riego presurizado son una manera de reducir la demanda hídrica, lo que a su vez permite aumentar la disponibilidad del agua para otras partes del sistema de distribución. Se necesitaría un análisis más detallado para saber dónde enfocar mejor las mejoras de riego y para cuantificar la demanda adicional de energía y los limites y capacidades en la infraestructura de distribución eléctrica en la provincia.

RDM proporciona un marco analítico útil para evaluar tanto los desafíos futuros que enfrenta Irrigación, como diferentes estrategias que podrían utilizarse para mitigar la escasez futura. Este estudio proporciona valor a al actualizar el modelo de sistema de Irrigación para evaluar las condiciones climáticas y demográficas futuras, y al evidenciar cómo las tendencias en ambos podrían conducir a una grave escasez en las próximas décadas. Este análisis también destaca los sectores agrícolas clave que están en particular riesgo, al tiempo que muestra los costos y beneficios relativos de diferentes estrategias.

Este análisis puede ser fortalecido de manera significativa mediante iteraciones adicionales del enfoque RDM. Específicamente, otra ronda de mejoras del modelo podría ayudar a resolver las preguntas que este estudio planteó sobre la demanda urbana insatisfecha. Si bien el modelo del sistema está bien calibrado para las condiciones actuales, la forma en que el modelo responde a una gama más amplia de condiciones climáticas y de uso de suelo de las introducidas inicialmente en este estudio, así como un mejor reflejo de la temporalidad de regulación de los reservorios, podría conducir a un comportamiento poco realista. En este sentido, asegurar el funcionamiento apropiado del modelo para proyecciones de uso del suelo y clima más extremos aumentaría la confiabilidad de todos los resultados presentados en este estudio.

Con las mejoras sugeridas, mayor y mejor información podría generarse para desarrollar y modelar un nuevo conjunto de estrategias de riego evaluadas en diferentes regiones, y no en todas de manera proporcional. Modelar estas nuevas estrategias de riego más matizadas, combinadas con estimaciones de costos más detalladas, proporcionaría una guía útil para tomas decisiones al corto plazo sobre inversiones de infraestructura hídrica.

REFERENCIAS

Escobar, M., Lima, N., Purkey, D., Yates, D., & Forni, L. (2013). Modelacion hidrológica y escenarios de cambio climáticos en cuencas de suministros de agua de las ciudades de La Paz y el Alto, Bolivia. Aqua-LAC, 23-34.

Groves, David G., Laura Bonzanigo, James Syme, Nathan L. Engle, and Ivan Rodriguez Cabanillas. 2018. "Preparing for Future Droughts in Lima, Peru: Enhancing Lima's Drought Management Plan to Meet Future Challenges." Washington, D.C.

Kalra, Nidhi Rajiv, David G. Groves, Laura Bonzanigo, Edmundo Molina Perez, Cayo Leonidas Ramos Taipe, Ivan Rodriguez Cabanillas, and Carter J. Brandon. 2015. "Robust Decision-Making in the Water Sector : A Strategy for Implementing Lima's Long-Term Water Resources Master Plan." http://documents.worldbank.org/curated/en/2015/06/24701804/peru-robust-decision-making-water-sector-strategy-implementing-lima's-long-term-water-resources-master-plan.

Lempert, Robert. J. 2019. "Robust Decision Making (RDM)." In *Decision Making under Deep Uncertainty*, 23–51. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2_2.

Marchau, Vincent A. W. J., Warren E. Walker, Pieter J. T. M. Bloemen, and Steven W. Popper, eds. 2019. *Decision Making under Deep Uncertainty*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2.

Molina-Perez, Edmundo, David G. Groves, Steven Popper, Aldo Ramirez, and Rodrigo Crespo-Elizondo. 2019. *Developing a Robust Water Strategy for Monterrey, Mexico: Diversification and Adaptation for Coping with Climate, Economic, and Technological Uncertainties*. RAND Corporation. https://doi.org/10.7249/RR3017.

*Purkey, D., Escobar Arias, M., Mehta, V., Forni, L., Depsky, N., Yates, D., & Stevenson, W. (2018). Philosophical Justification for a Novel Analysis-Supported, Stakeholder-Driven Participatory Process for Water Resoruces Planning and Decision Making. Water.*Ray, Patrick A., and Casey M. Brown. 2015. *Confronting Climate Uncertainty in Water Resources Planning and Project Design: The Decision Tree Framework*. The World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0477-9.