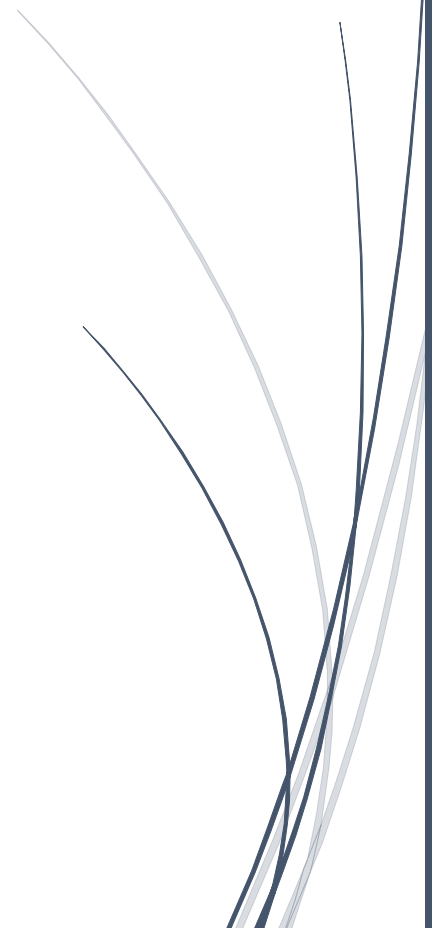


PLAN MAESTRO PARA EL SECTOR HÍDRICO DE LA PROVINCIA DE MENDOZA

Informe 2.2 - Proyecciones De La Oferta

Enero 2024



Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
2. RESUMEN EJECUTIVO	8
3. OBJETIVO DEL INFORME	9
4. ACTUALIZACIONES SOBRE EL AGUA DISPONIBLE	10
4.1. AGUA SUBTERRÁNEA	10
4.2. DISPONIBILIDAD DE AGUA SUPERFICIAL	32
4.3. AGUA TRATADA	32
5. INFORME SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO	34
5.1. RESUMEN EJECUTIVO	34
5.2. INTRODUCCIÓN	36
5.3. METODOLOGÍA	39
5.4. RESULTADOS	41
5.5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	49
6. AGUA DISPONIBLE PROYECTADA PARA 2030,2040 Y 2050	53
6.1. AGUA SUPERFICIAL	53
6.2. AGUA SUBTERRÁNEA	56
6.3. AGUA TRATADA	86
6.4. RESUMEN DEL AGUA DISPONIBLE PROYECTADA	87
7. CONCLUSIONES	93
7.1. AGUA SUPERFICIAL	93
7.2. AGUA SUBTERRÁNEA	93
7.3. AGUA TRATADA	95
8. BIBLIOGRAFÍA	96

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

INFORMES ADJUNTOS

El informe de IANIGLA "PROYECCIONES DEL CLIMA Y DE LA OFERTA HÍDRICA PARA LAS PRÓXIMAS DÉCADAS EN LA PROVINCIA DE MENDOZA - agosto de 2023" de Ezequiel Toum, Juan A. Rivera, Maximiliano Viale, se adjunta (copia digital).

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1: Agua Disponible Proyectada - Mendoza (Hm ³)	8
Tabla 2-2: Volúmenes Acumulados de Agua Subterránea en hm ³	9
Tabla 2-3: Volúmenes potenciales de agua tratada en hm ³ /año	9
Tabla 4-1: Clasificación de acuíferos por INA, cubriendo las áreas de recarga administradas mapeadas en la Figura 4-2. El rendimiento específico fue modificado y analizado en el transcurso de este trabajo (ver Tabla 4-2).	22
Tabla 4-2: Variación de almacenamiento de aguas subterráneas en la provincia de Mendoza entre 2007-2022.	24
Tabla 4-3: Componentes del balance anual de aguas subterráneas.....	28
Tabla 4-4: Valores de agua disponibles actualizados	32
Tabla 4-5: Capacidad real del agua tratada.....	33
Tabla 5-1: Cambios previstos en el agua disponible superficial en la provincia de Mendoza para los diferentes períodos con respecto al período 2000-2020.....	36
Tabla 5-2: Modelos climáticos globales y regionales que se utilizaron en el estudio	41
Tabla 5-3: Cambios esperados en los parámetros hidro-climáticas en la provincia de Mendoza para los diferentes períodos respecto al 2000-2020	49
Tabla 5-4: Cambios esperados en el agua disponible en la provincia de Mendoza para los diferentes períodos respecto al 2000-2020	49
Tabla 5-5: Cambio en el caudal para 2050 con respecto al período base 2001-2010	51
Tabla 5-6: Proyección IANIGLA 2050.....	52
Tabla 5-7: Proyección Mekorot 2050	52
Tabla 6-1: Agua superficial disponible prevista hasta 2050	53
Tabla 6-2: Agua disponible Mendoza, percentiles anuales - Agua disponible (Hm ³).....	55
Tabla 6-3: Probabilidad de Ocurrencia.....	56
Tabla 6-4: Balance Hídrico actual. Valores expresados en Hm ³ /año.....	59
Tabla 6-5: oferta hídrica total del sistema para el periodo 2001 a 2022 (hm ³ /año).....	62

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 6-6: Oferta hídrica de acuerdo con el modelo calibrado hasta el año 2050 (hm ³ /año)	64
Tabla 6-7: Balance Hídrico Global del Acuífero del Río Tunuyán Inferior (hm ³ /año)	68
Tabla 6-8: Balance Hídrico Global proyectado del Acuífero del Río TI (2021-2050), en hm ³ /año	69
Tabla 6-9: Balance Hídrico Global del Acuífero del Río Mendoza (hm ³ /año).....	71
Tabla 6-10: Balance Hídrico Global proyectado del Acuífero del Río Mendoza (2021-2050), en hm ³ /año	73
Tabla 6-11: Balance Hídrico Global del Acuífero del Río Atuel, en hm ³ /año.....	75
Tabla 6-12: Balance Hídrico Global proyectado del Acuífero del Río Atuel (2021-2050), en hm ³ /año.	77
Tabla 6-13: Balance Hídrico global del acuífero Río Diamante (hm ³ /año).....	80
Tabla 6-14: Balance Hídrico Global proyectado del Acuífero del Río Diamante (2021-2050), en hm ³ /año	81
Tabla 6-15: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Tunuyán Superior (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm ³	82
Tabla 6-16: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Tunuyán Inferior (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm ³	83
Tabla 6-17: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Mendoza (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm ³	83
Tabla 6-18: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Atuel (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm ³	83
Tabla 6-19: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Diamante (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm ³	83
Tabla 6-20: Producción de agua subterránea recomendada en hm ³	84
Tabla 6-21: Volumen potencial de agua tratada 2030, 2040 y 2050, en hm ³ /año.....	86
Tabla 6-22: capacidad de tratamiento actual en la provincia, en hm ³ /año	86
Tabla 6-23: Resumen Del Agua Disponible Proyectada (Hm ³)	87
Tabla 7-1: Cambios previstos en el agua disponible en la provincia de Mendoza para los diferentes períodos con respecto al período 2000-2020.....	93
Tabla 7-2: Volúmenes recomendados de producción de agua subterránea, en hm ³ /año.....	95
Tabla 7-3: Volúmenes potenciales de agua tratada, en hm ³ /año	95

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

LISTA DE FIGURAS

Figura 4-1: Cobertura de pozos de agua subterránea (puntos)	10
Figura 4-2: Áreas administrativas de aguas subterráneas que componen las principales cuencas de la provincia de Mendoza.....	11
Figura 4-3: Columna estratigráfica de la provincia de Mendoza. Los colores corresponden al mapa geológico de la Figura 4-2.	12
Figura 4-4: Niveles de agua subterránea (líneas verdes) en la cuenca norte durante la temporada de invierno de 2022, perfilados en intervalos de 20 m.	14
Figura 4-5: Niveles de agua subterránea (líneas verdes) en la cuenca central de Tunuyán Superior durante la temporada de invierno de 2022, contorneados en intervalos de 50 m. Agua Superficial ..	15
Figura 4-6. Niveles freáticos (líneas verdes) en las zonas Diamante y Atuel de la cuenca sur durante la temporada invernal de 2022, contorneados en intervalos de 20 m.....	16
Figura 4-7: Hidrogramas de pozos seleccionados en el área de recarga de Margen Izquierda de la cuenca norte.	17
Figura 4-8: Hidrogramas de pozos seleccionados en el área de recarga de Margen Derecha de la cuenca norte. Se aprecia un aumento del nivel del agua subterránea durante 2007-2022.....	18
Figura 4-9: Hidrogramas de pozos seleccionados en el área de recarga Tunuyán Inferior de la cuenca norte. Se aprecia una disminución del nivel del agua subterránea durante 2007-2022.	18
Figura 4-10: Hidrogramas de pozos seleccionados en la cuenca centro de Tunuyán Superior. La faltade dato aumenta la incertidumbre de las tendencias de los niveles de agua subterránea.....	18
Figura 4-11: Hidrogramas de pozos seleccionados en las zonas de recarga de la Cuenca Sur. La falta de datos aumenta la incertidumbre de las tendencias de los niveles de agua subterránea.	19
Figura 4-12: Variación promedio anual del nivel freático durante 2007-2022 en la cuenca norte. Se excluyen los pozos con coeficiente de correlación (R^2) $<0,7$ (círculos blancos).....	19
Figura 4-13: Variación promedio anual del nivel freático durante 2007-2022 en la cuenca centro del Tunuyán Superior. Se excluyen los pozos con coeficiente de correlación (R^2) $<0,7$ (círculos blancos). 20	
Figura 4-14. Variación promedio anual del nivel freático durante 2007-2022 en las zonas de recarga de la cuenca sur.....	21
Figura 4-15: Rendimiento específico en la cuenca sur basado en datos de pruebas de bombeo de pozos (INA-CRAS, 1981), en comparación con las áreas de recarga administradas (ver también Figura 4-2 y línea gris en la Figura 4-14). Los rangos generalizados de rendimiento específico para cada área (compuestos por varios polígonos) se indican en rojo. Los números negros indican el área en hectáreas de cada polígono.	24

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Figura 5-1: Cambios esperados (%) en los volúmenes de agua disponibles de Mendoza para los períodos 2030, 2050 y 2070 con respecto al período de referencia de 2000-2020	36
Figura 5-2: La Cordillera de los Andes en la provincia de Mendoza, Fuente: Rivera y Arnould, 2020..	38
Figura 5-3: Los principales ríos de la provincia de Mendoza	39
Figura 5-4: Anomalía de las temperaturas medias para el periodo 2020-2040 respecto a la línea base	42
Figura 5-5: Media (naranja) y máx. (azul) tendencia de las temperaturas anuales en los Andes de Mendoza, 5126 m	42
Figura 5-6: Evaporación anual en Mendoza, elevación 1665 m.....	43
Figura 5-7: Anomalía de precipitación (%) para el período 2030 - 2050 con respecto a la línea base 1970-2000.	44
Figura 5-8: Precipitación anual simulada en las regiones andinas de gran altitud en Mendoza	45
Figura 5-9: Anomalía de precipitación mensual (%) para el periodo 2030-2039 respecto a la línea base 1995-2014.	45
Figura 5-10: Desviación estándar de precipitación anual para Mendoza (regiones de gran altitud) ...	46
Figura 5-11: El índice de sequía SPEI (precipitación y evaporación) para diferentes escenarios climáticos para Mendoza	46
Figura 5-12: Acumulación anual de nieve en la zona de los Andes de Mendoza: 5126m	47
Figura 5-13: Anomalía del volumen medio anual de caudales para el período 2030-2050 con respecto a la línea base 1970-2000	48
Figura 5-14: Cambios mensuales (%) en los volúmenes de agua del río Mendoza para los períodos 2030, 2050 y 2070 con respecto al período base de 1970-2000	48
Figura 5-15: Cambios (%) en los volúmenes de agua disponibles en Mendoza para los períodos 2030, 2050 y 2070 respecto al período base 2000-2020.....	49
Figura 6-1: Correlaciones entre las distintas variables.....	61
Figura 6-2: Oferta Hídrica. Cuenca Río Tunuyán	63
Figura 6-3: Tendencia Oferta Hídrica. Cuenca río Tunuyán Superior. Media móvil de 10 años.	63
Figura 6-4: Tendencia en los valores de oferta hídrica total, escenario proyectado	65
Figura 6-5: Derrames anuales Río Tunuyán en Valle de Uco hacia el año 2050	65
Figura 6-6: Volumen extraído del acuífero, proyectado al año 2050.....	65
Figura 6-7: Media móvil de 10 años. Volumen Extraído del acuífero, escenario proyectado a 2050... ..	66
Figura 6-8: Correlación entre los valores de oferta total e Ingresos al acuífero (Mendoza).....	72
Figura 6-9: Correlación entre los valores de oferta total e Ingresos al acuífero (Atuel)	76
Figura 6-10: Correlación entre los valores de oferta total e Ingresos al acuífero (Diamante)	80

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Figura 6-11: Oferta proyectada de Agua Superficial, periodo de retorno de 10 años, percentil del 10%	88
Figura 6-12: Oferta proyectada de Agua Superficial, periodo de retorno de 2 años, percentil del 50%	89
Figura 6-13: Oferta proyectada de Agua Superficial, periodo de retorno de 2 años, percentil del 90%	90
Figura 6-14: Volumen Acumulado De Agua Subterránea Proyectado	91
Figura 6-15: Volumen de agua tratada proyectado	92

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

1. INTRODUCCIÓN

Este informe presenta los cálculos del suministro de agua proyectado en la provincia de Mendoza, para los años 2030, 2040 y 2050.

Las proyecciones se han realizado en base a los cálculos de agua disponible presentados en el informe 1.1 y según el informe sobre la influencia del cambio climático en los recursos hídricos de la provincia (capítulo 5).

- Agua Superficial: proyecciones de disponibilidad de agua superficial para 2030, 2040 y 2050.
- Aguas Subterráneas: Estimaciones de cambio en el almacenamiento de aguas subterráneas debido a los efectos del cambio climático para 2030, 2040 y 2050.
- Aguas Tratadas: presentación del potencial de Agua Tratada según las proyecciones de demanda de agua potable (Informe 3) para 2030, 2040 y 2050.

2. RESUMEN EJECUTIVO

El Informe 2 trata de las proyecciones de los recursos hídricos para la Provincia de Mendoza. Las proyecciones se realizaron para los años 2030, 2040 y 2050.

Las proyecciones se realizaron con base en la disponibilidad real de agua (agua superficial, agua tratada y agua subterránea) y con los cambios previstos tal como se presentan en el informe sobre cambio climático (capítulo 5).

La siguiente tabla presenta las proyecciones de agua superficial disponible en la provincia en general para los diferentes percentiles.

Tabla 2-1: Agua Disponible Proyectada - Mendoza (Hm³)

	Percentiles	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
	Probabilidad de Ocurrencia	Cada 20 años	Cada 10 años	Cada 4 años	Cada 2 años	Cada 4 años	Cada 10 años	Cada 20 años
Total	Año	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
	2030	1.994	2.452	3.093	4.070	5.047	5.688	6.146
	2040	1.866	2.327	2.971	3.955	4.939	5.583	6.044
	2050	1.744	2.209	2.859	3.850	4.841	5.491	5.956

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

La siguiente tabla presenta los volúmenes acumulados de agua subterránea disponible (basados en el modelo WEAP) hasta el año 2050.

Tabla 2-2: Volúmenes Acumulados de Agua Subterránea en hm³

Año	2020 a 2030	2030 a 2040	2040 a 2050
Cuenca	Volumen acumulado en 10 años	Volumen acumulado en 20 años	Volumen acumulado en 30 años
Mendoza	2.413	4.827	7.242
Tunuyán Inferior	2.750	4.124	8.351
Tunuyán Superior	2.740	7.870	12.407
Atuel	513	1.009	1.497
Diamante	188	342	481

Tabla 2-3: Volúmenes potenciales de agua tratada en hm³/año

Cuenca	Volumen	2030	2040	2050
Mendoza	106	119,2	128,8	139,2
Tunuyán Superior	4	13,1	14,4	15,8
Tunuyán Inferior	12	26	28	30
Diamante	5	13,6	14,3	15,1
Atuel	4	9,7	10,2	10,6
Malargüe	0	3,1	3,3	3,6
TOTAL	131	184	199	214
Falta	-	53	68	83

3. OBJETIVO DEL INFORME

El Informe N° 2, está enfocado en la evaluación de las proyecciones de los recursos hídricos (Aguas Subterráneas, Superficiales y Tratadas), en Mendoza, para las décadas 2030, 2040 y 2050. Junto con el Informe N° 3 (Informe de Proyecciones de Demanda de Agua), se presentará la proyección del balance hídrico.

El Informe N° 4 se enfocará en los BALANCES HÍDRICOS PROSPECTIVOS.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

4. ACTUALIZACIONES SOBRE EL AGUA DISPONIBLE

4.1. AGUA SUBTERRÁNEA

4.1.1. NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA

Los acuíferos de la provincia de Mendoza comprenden varias cuencas, principalmente la cuenca norte del Río Mendoza y Tunuyán Inferior, la cuenca centro del Tunuyán Superior (Valle de Uco) y la cuenca sur de Diamante y Atuel (Figuras 4-1). Cada cuenca se gestiona tanto la distribución del agua superficial como la asignación del agua subterránea.

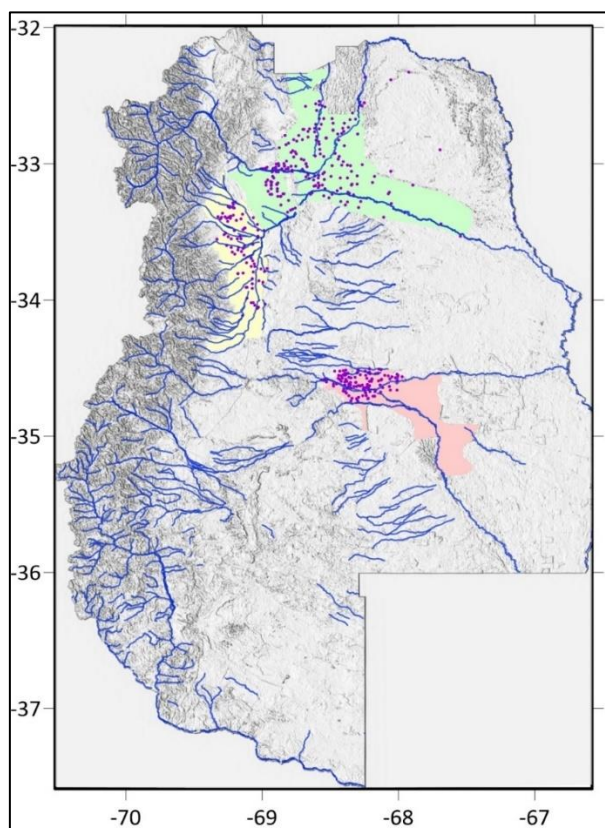


Figura 4-1: Cobertura de pozos de agua subterránea (puntos)¹

Las cuencas se dividen en unidades de manejo con el objetivo de gestionar el recurso hídrico (Figura 4-2), sin embargo, la extensión espacial e hidrogeológica asumida de los acuíferos está más allá de estos límites. No hay una delimitación precisa de hasta dónde se extienden los acuíferos sobre todo en las zonas distales donde los límites del acuífero son difusos.

¹ Cuenca Norte: Tunuyán Inferior y ambas márgenes del río Mendoza(verde), Tunuyán Superior (amarillo) y Diamante y Atuel (rosa). Los cursos de agua se denotan con líneas azules.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

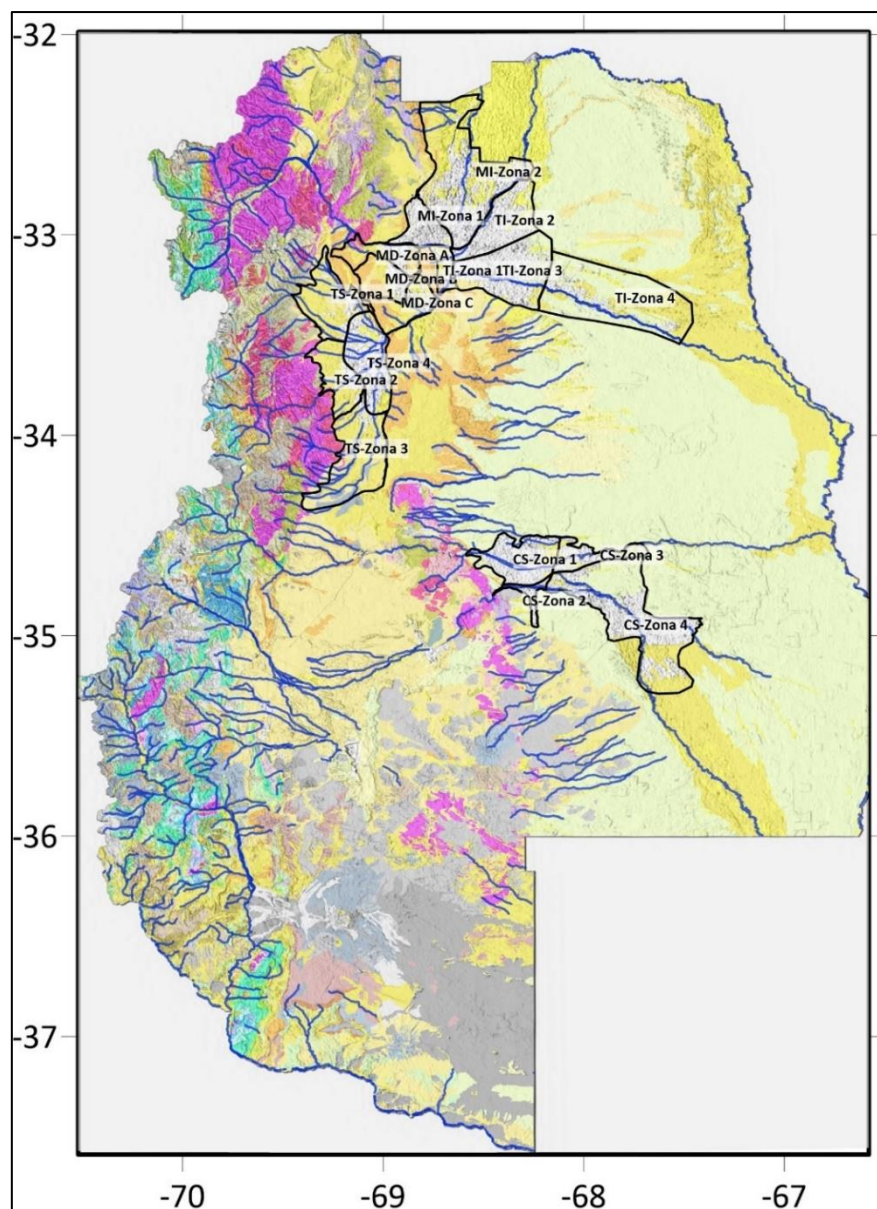


Figura 4-2: Áreas administrativas de aguas subterráneas que componen las principales cuencas de la provincia de Mendoza².

² Se desconoce la extensión de los acuíferos más allá de las unidades de manejo. Los colores de fondo indican unidades geológicas (leyenda en la Figura 4-3).

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

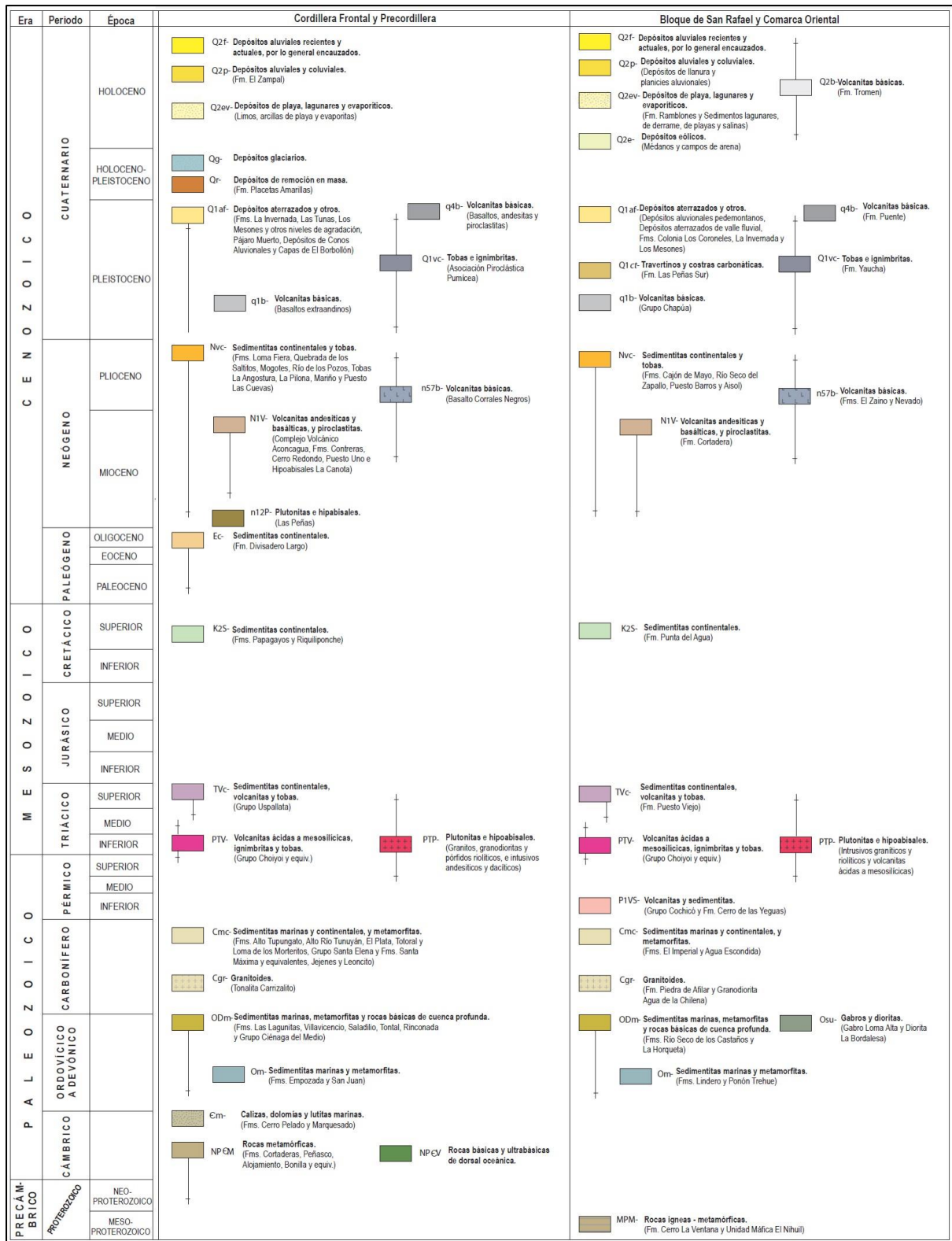


Figura 4-3: Columna estratigráfica de la provincia de Mendoza. Los colores corresponden al mapa geológico de la Figura 4-2.

Las tendencias de variación de nivel del agua subterránea reflejan las variaciones del almacenamiento en los acuíferos. Cuando los niveles del agua subterránea permanecen estables no se producen

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

variaciones de almacenamiento en los acuíferos, pero cuando se producen elevaciones o descensos en los niveles del acuífero, se producen variaciones en el almacenamiento disponible en el acuífero.

La información disponible de niveles estáticos de los acuíferos proviene de las campañas de medición realizadas entre los meses de mayo a julio cuando la mayoría de los pozos no están bombeando. Durante este periodo algunas de las perforaciones continúan funcionando y no solamente no se puede realizar la medición del nivel estático, sino que además afectan las mediciones realizadas en las perforaciones vecinas. Debido a esto la precisión de la medición es limitada.

Las Figuras 4-4 a 4-6 muestran los niveles de agua subterránea medidos a partir de 2022. En la Cuenca Norte, el Río Mendoza inicia su escurrimiento desde el oeste en la cordillera de Los Andes hasta la planicie aluvial, cruzando un área de rocas piroclásticas de probable alta conductividad hidráulica, como ignimbrita, toba y piedra pómez.

Al oeste de la cuenca los niveles de agua subterránea son más altos con aprox. +1000 m. El gradiente excepcionalmente alto en esta área puede estar asociado con la transición del acuífero libre al acuífero confinado/semiconfinado. En este caso, la transición comienza al oeste de la línea de confinamiento asumida por el INA (ver Tabla 4-1 a continuación). Sin embargo, según información del DGI, los acuíferos se asumen en su mayoría como un sistema multiacuífero, lo que implica que la transición del acuífero libre al acuífero confinado/semiconfinado juega un papel menor en la formación de este patrón de gradiente. Otros posibles mecanismos responsables de esto pueden estar asociados con la configuración tectónica del área, posiblemente involucrando fallas no detectadas. También es posible que las unidades geológicas estén compuestas de subunidades, estratigráficamente separadas por limo o arcilla aluvial, formando acuíferos locales colgados.

Para comprender mejor el patrón del nivel del agua subterránea en esta área, estas especulaciones requieren más investigaciones hidrogeológicas.

En la Margen Izquierda del Río Mendoza, gradiente freático continúa hacia el noreste. En la parte oriental del área de recarga, los niveles de agua subterránea disminuyen en dirección *E-SE*, hacia la zona distal de la cuenca. Esta dirección de gradiente posiblemente esté asociada con la dirección del flujo superficial de los cursos de agua que cruzan la región.

En la Margen Derecha del Río Mendoza (Subcuenca El Carrizal) el gradiente freático del acuífero es hacia el sureste.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

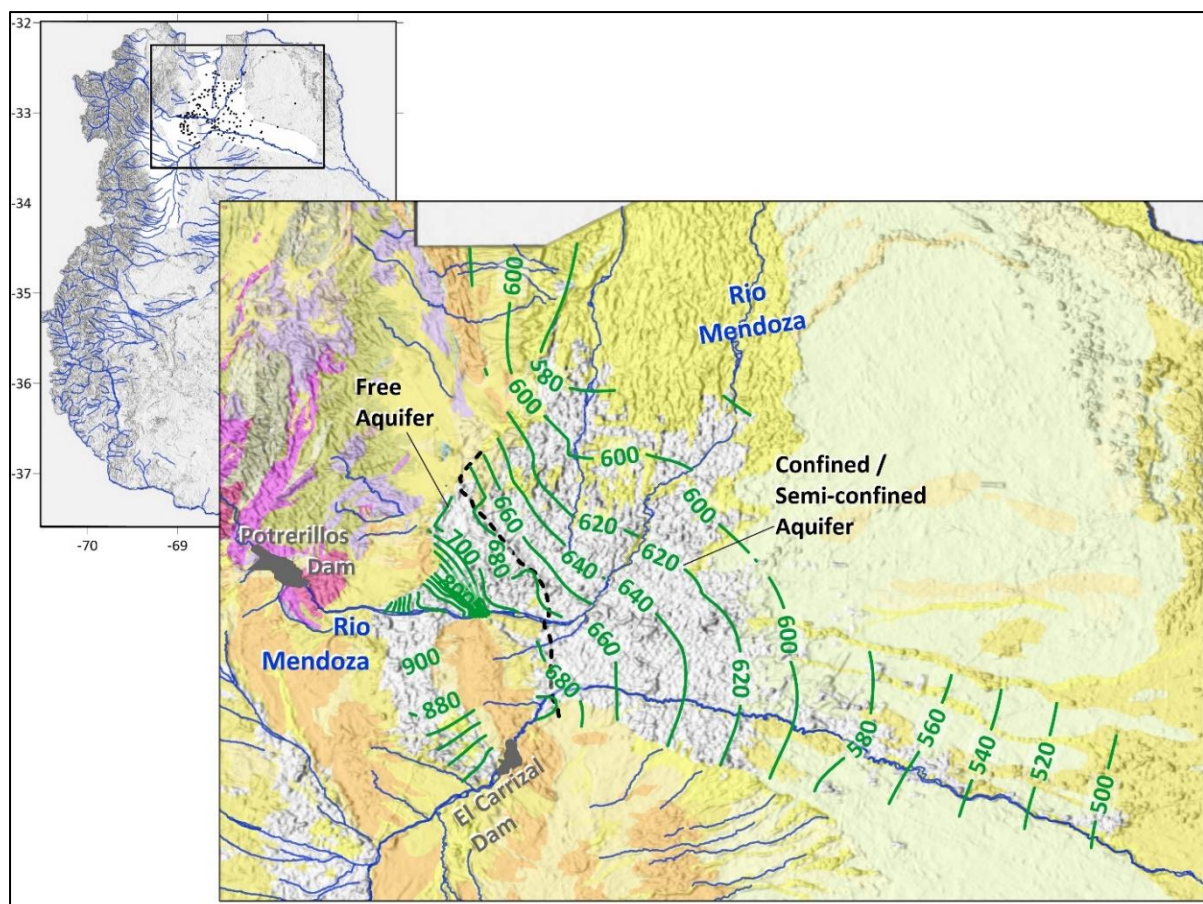


Figura 4-4: Niveles de agua subterránea (líneas verdes) en la cuenca norte durante la temporada de invierno de 2022, perfilados en intervalos de 20 m³.

Los niveles freáticos en la cuenca centro del Tunuyán Superior, ocupada por el Valle de Uco, son más altos en su zona noroeste superando los +1450 m, y los +1300 m en su zona más meridional (Figura 4-5). Cabe destacar que estos niveles son varios cientos de metros más altos que los niveles de agua subterránea en Tunuyán Inferior, posiblemente debido a la proximidad de la cuenca del Tunuyán Superior a las montañas que la delimitan desde el oeste. Además, el flujo entrante aquí se debe a múltiples ríos, por ejemplo, Río Las Tunas, Río Grande, Río Tunuyán, Río Del Rosario y Río Yaucha. Los niveles de agua subterránea disminuyen más hacia el interior del área de recarga y convergen en su parte oriental a aproximadamente +900 m.

³ Los cursos de agua se indican con líneas azules, incluido el río Mendoza que ingresa a la cuenca desde el oeste. Los colores de fondo indican unidades geológicas (leyenda en la Figura 4-3). Destacan rocas piroclásticas (magenta) donde el río se acerca a la cuenca.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

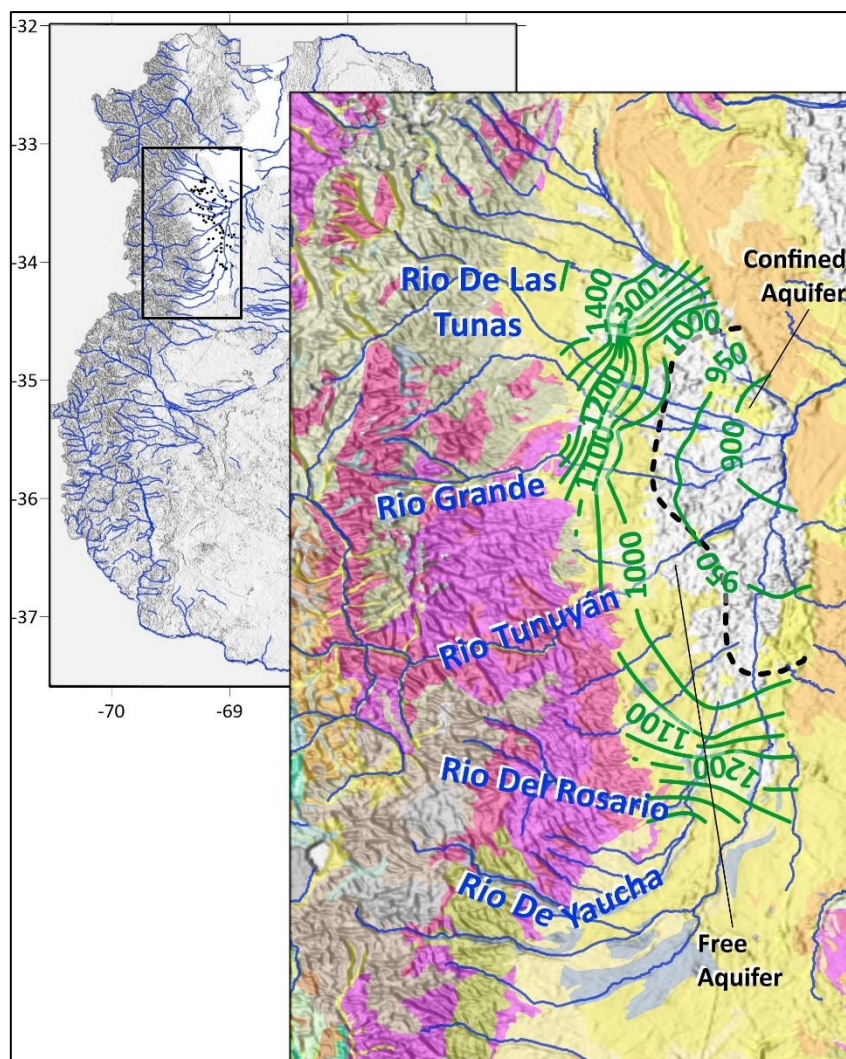


Figura 4-5: Niveles de agua subterránea (líneas verdes) en la cuenca central de Tunuyán Superior durante la temporada de invierno de 2022, contorneados en intervalos de 50 m⁴. Agua Superficial

Al igual que en la cuenca Tunuyán Inferior, las direcciones del gradiente del agua subterránea parecen coincidir con la dirección del flujo superficial de los cursos de agua que cruzan el valle. Estos cursos de agua ingresan al Valle de Uco desde el oeste, a través de una zona de rocas piroclásticas (Figura 4-5) como ignimbrita, toba y piedra pómez. El Río Yaucha, ingresando al valle desde el sur, atraviesa dichas rocas y sedimentos marinos. La evidente presencia tanto de piroclásticos como de sedimentos en las zonas de aproximación de los cursos de agua al valle puede estar asociada a los altos niveles freáticos observados en estas zonas. Por lo tanto, se especula que el entorno geológico alberga un componente de recarga del subsuelo, además del flujo entrante superficial al oeste del valle. De ser así, entonces

⁴ Los cursos de agua se indican con líneas azules, incluidos los ríos Río Las Tunas, Río Grande, Río Tunuyán, Río Del Rosario y Río Yaucha que ingresan a la cuenca desde el oeste y el sur. Los colores de fondo indican unidades geológicas (leyenda en la Figura 4-3). Destacan los sedimentos marinos (amarillo fangoso) y las rocas piroclásticas (magenta) donde los cursos de agua se acercan al valle.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

las rocas observadas en esta zona son de alta conductividad hidráulica (posiblemente sedimentos marinos fracturados y/o piroclásticos porosos).

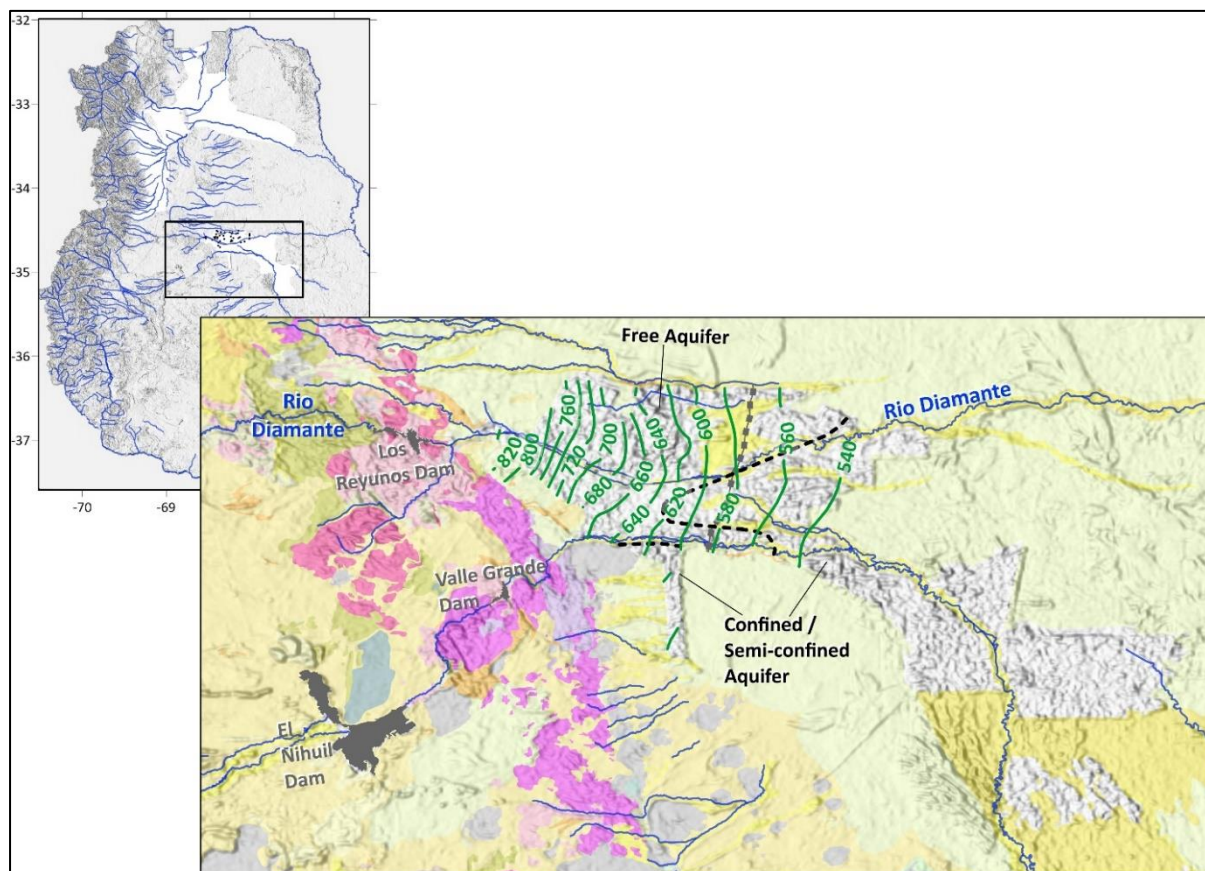


Figura 4-6. Niveles freáticos (líneas verdes) en las zonas Diamante y Atuel de la cuenca sur durante la temporada invernal de 2022, contorneados en intervalos de 20 m.⁵

La cuenca sur del Diamante y Atuel tiene niveles freáticos más bajos (Figura 4-6), en comparación con la cuenca centro. Niveles de aprox. +820 m se observan en la parte occidental de la cuenca, por donde ingresa el Río Diamante. A medida que el Río Diamante se acerca a la cuenca, atraviesa una zona de sedimentitas metamorfizadas y plegadas de origen marino. Esta evidencia geológica plantea la cuestión de la conductividad hidráulica de estos sedimentos. Por ejemplo, en el caso de rocas fracturadas es posible que aporten un componente de recarga del subsuelo, además del flujo superficial entrante del río. En cualquier caso, dicha recarga podría ser parcialmente responsable de los altos niveles de agua subterránea observados en la parte occidental de la cuenca. Al igual que en las cuencas norte y central de la provincia de Mendoza, el gradiente de agua subterránea parece disminuir en la misma dirección

⁵ Los cursos de agua se indican con líneas azules, incluido el río Diamante que ingresa a la cuenca desde el oeste. Los colores de fondo indican unidades geológicas (leyenda en la Figura 4-3). Destacan los sedimentos marinos (amarillo fangoso) donde el río se acerca a la cuenca.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

del flujo superficial del río. Los niveles freáticos más bajos de la cuenca son de +540 m, observados en la zona más oriental cubierta por los datos disponibles.

El registro de mediciones de niveles freáticos en la provincia de Mendoza data de la década de 1970, y en algunas zonas de la década de 1960. Las tendencias del nivel de las aguas subterráneas se analizaron en el transcurso del presente informe de 2007 a 2022, para lograr resultados basados en un rango de tiempo suficiente de 15 años, incluidos los datos más recientes disponibles. Las Figuras 4-7 a 4-11 presentan hidrogramas de pozos seleccionados en cada cuenca, reflejando las tendencias del nivel del agua subterránea.

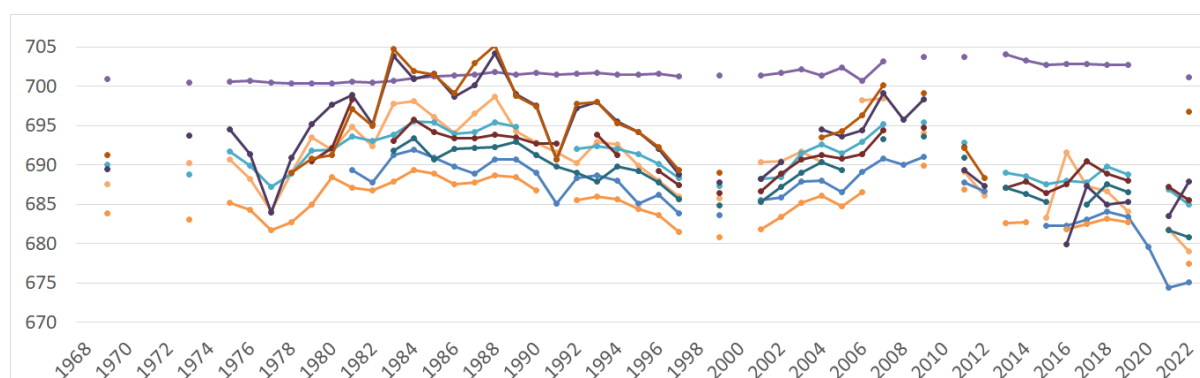


Figura 4-7: Hidrogramas de pozos seleccionados en el área de recarga de Margen Izquierda de la cuenca norte.⁶

La tendencia anual promedio se calculó para cada pozo por separado durante el período de 2007 a 2022. Los pozos que generaron un coeficiente de correlación (R^2) menor que 0,7 pueden indicar variaciones incoherentes o no concluyentes en el nivel del agua subterránea debido a datos faltantes a lo largo de los años o valores discontinuos por diversas razones (como efectos de pozos vecinos que bombean durante todo el año y que no pueden cerrar temporalmente). En estos casos, la precisión de las mediciones es limitada. Dichos pozos se excluyeron de este cálculo, lo que resultó en solo el 13% de los pozos en la cuenca norte, el 9% de los pozos en la cuenca centro y entre el 1% y el 2% de los pozos en la cuenca sur. Más del 90% de los datos faltantes en la cuenca sur se debe a la incompatibilidad de los códigos/nombres de los pozos antes y después de 2017. Las mediciones del nivel del agua subterránea se habían registrado como identificadores de pozos del INA hasta 2017 y desde entonces se han registrado como identificadores de pozos de la DGI. Aunque no se pudo encontrar un índice identificador que vincule a los dos, el trabajo actual estableció un índice parcial para algunos pozos donde la vinculación fue posible, gracias a información complementaria.

⁶ Es posible que los niveles de agua subterránea hayan estado disminuyendo entre 2007 y 2022, sin embargo, la información es limitada debido a las lagunas en los puntos de datos.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

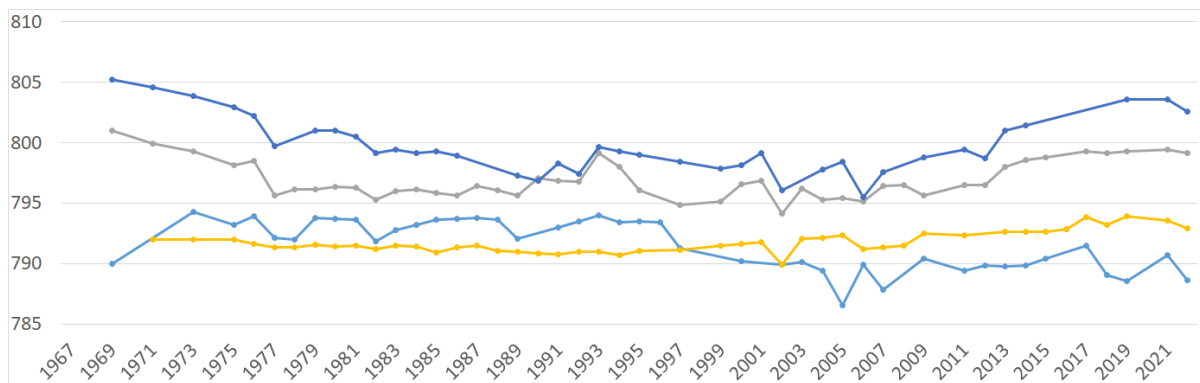


Figura 4-8: Hidrogramas de pozos seleccionados en el área de recarga de Margen Derecha de la cuenca norte. Se aprecia un aumento del nivel del agua subterránea durante 2007-2022.

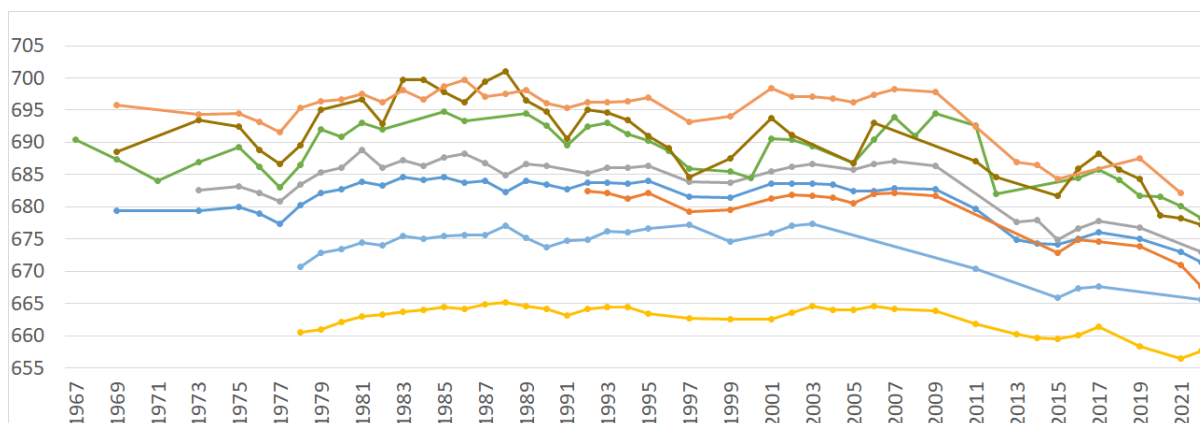


Figura 4-9: Hidrogramas de pozos seleccionados en el área de recarga Tunuyán Inferior de la cuenca norte. Se aprecia una disminución del nivel del agua subterránea durante 2007-2022.

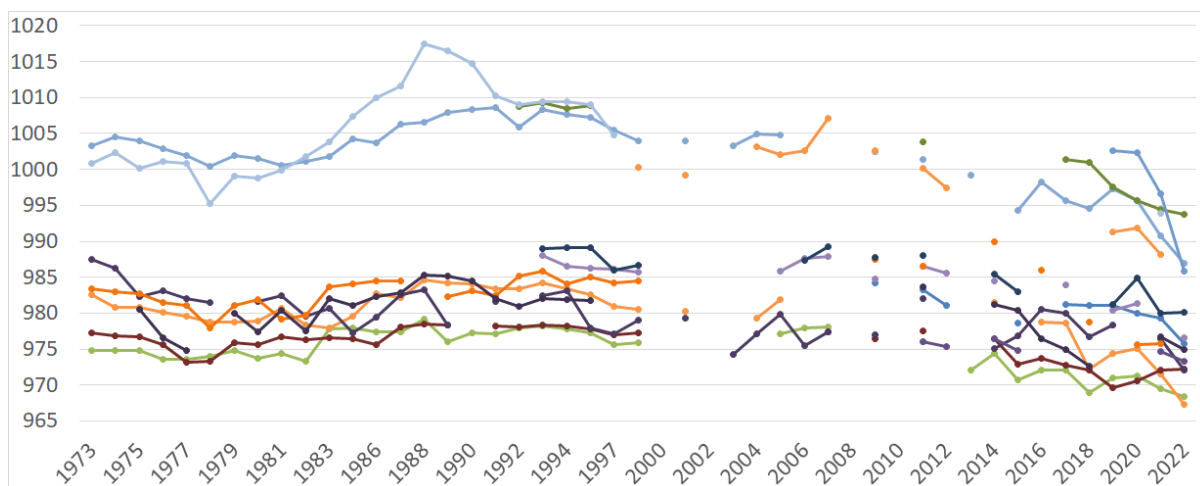


Figura 4-10: Hidrogramas de pozos seleccionados en la cuenca centro de Tunuyán Superior. La faltade dato aumenta la incertidumbre de las tendencias de los niveles de agua subterránea.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

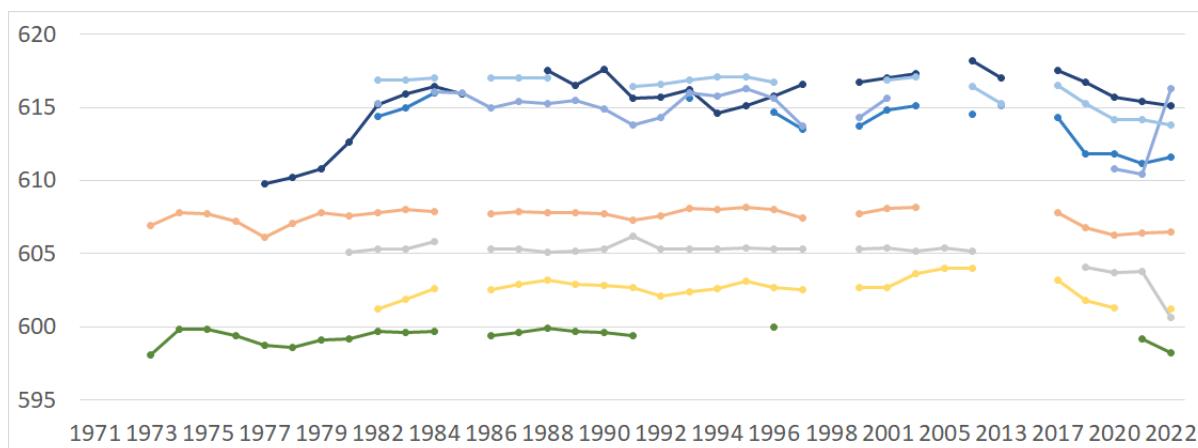


Figura 4-11: Hidrogramas de pozos seleccionados en las zonas de recarga de la Cuenca Sur. La falta de datos aumenta la incertidumbre de las tendencias de los niveles de agua subterránea.

La distribución espacial de la variación promedio anual del nivel freático en cada cuenca se presenta en las Figuras 4-12 a 4-14. Los niveles de agua subterránea han ido disminuyendo en las tres cuencas a una tasa promedio anual de hasta 2,5 m. Son pocos los pozos que parecen expresar un aumento aparente del nivel freático, a un ritmo medio anual de hasta 2,2 m.

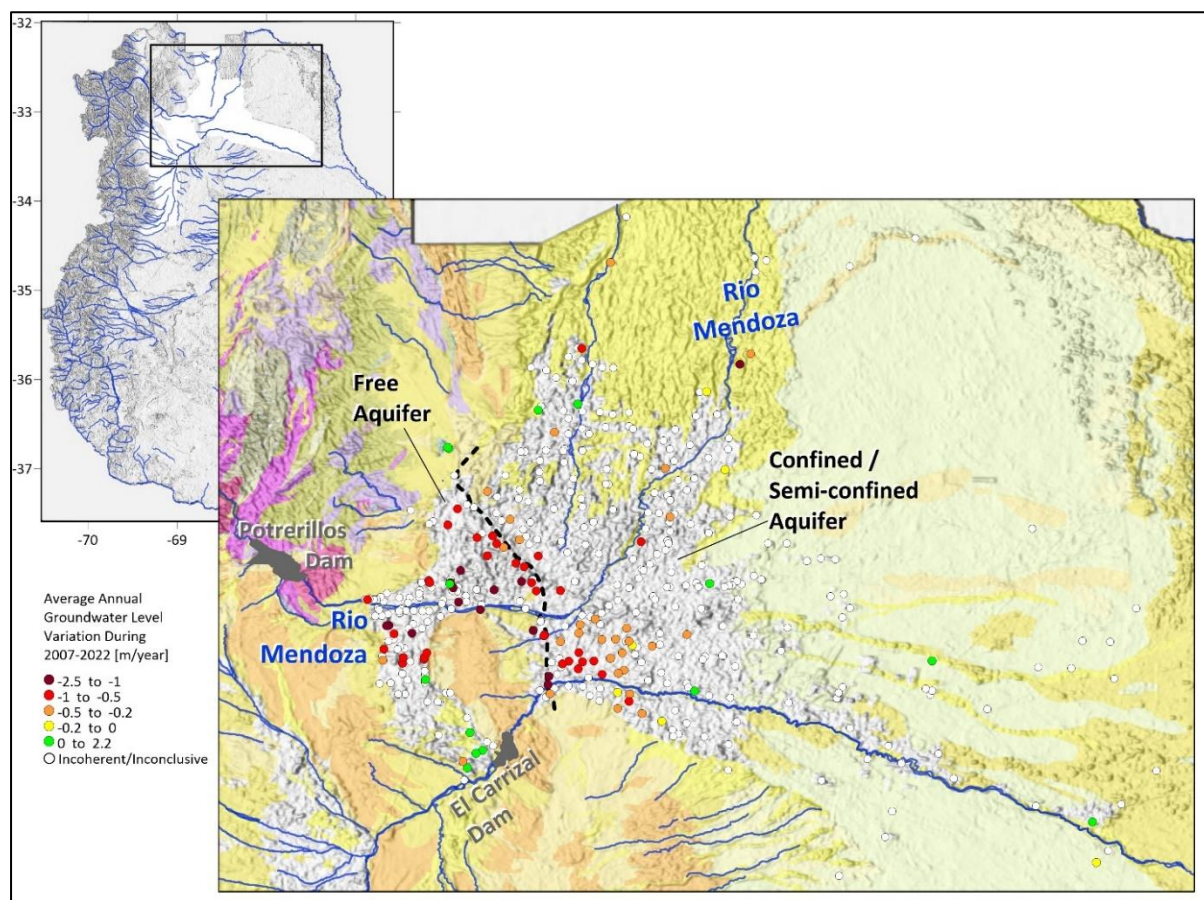
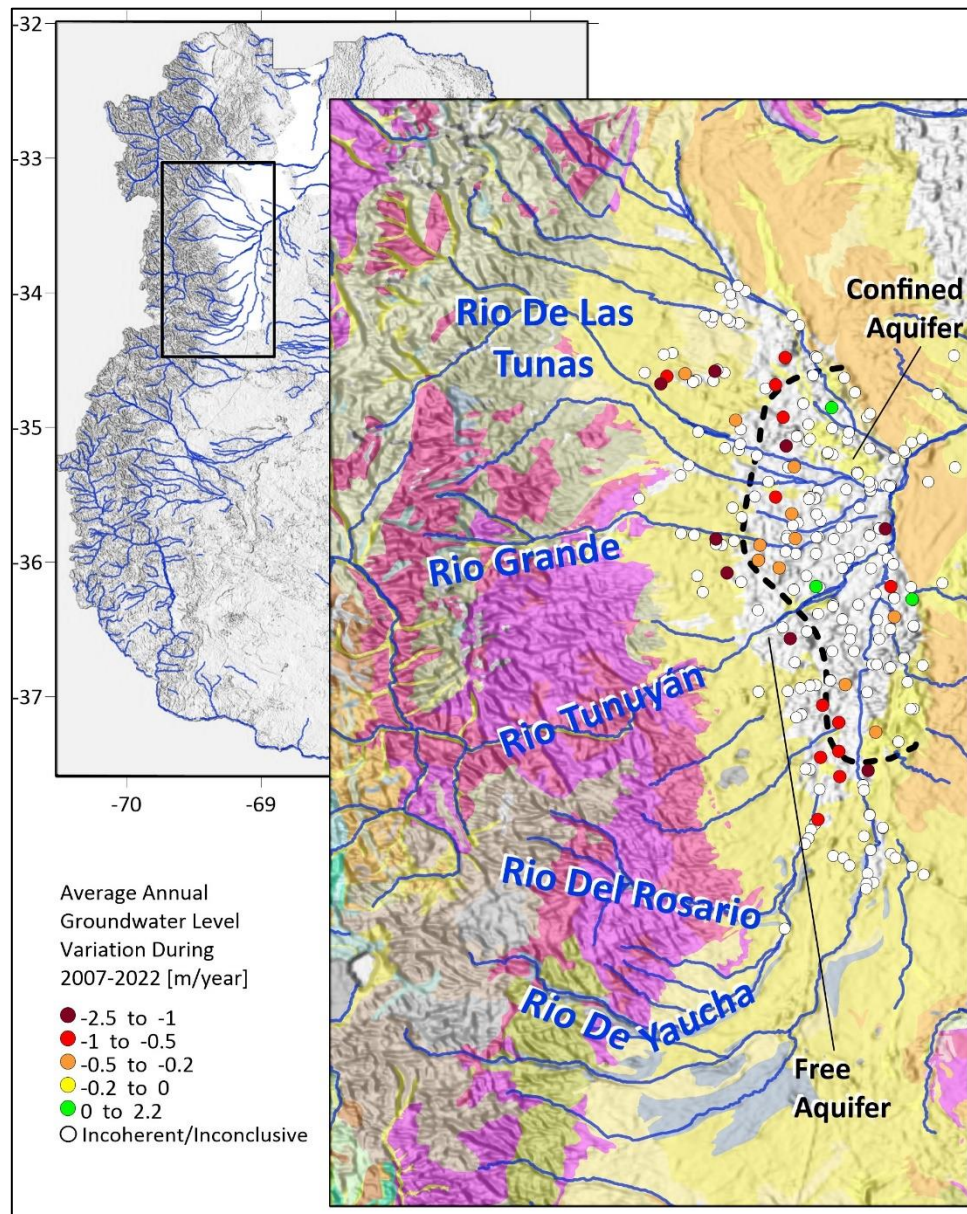


Figura 4-12: Variación promedio anual del nivel freático durante 2007-2022 en la cuenca norte. Se excluyen los pozos con coeficiente de correlación (R^2) < 0,7 (círculos blancos).

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

En las cuencas norte y central, la tasa de disminución es mayor en el oeste que en el este. Este patrón espacial puede estar asociado con los gradientes topográficos sustanciales en la parte occidental de estas cuencas (Figura 4-1), posiblemente más sensibles a cada variación de los niveles freáticos.



Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

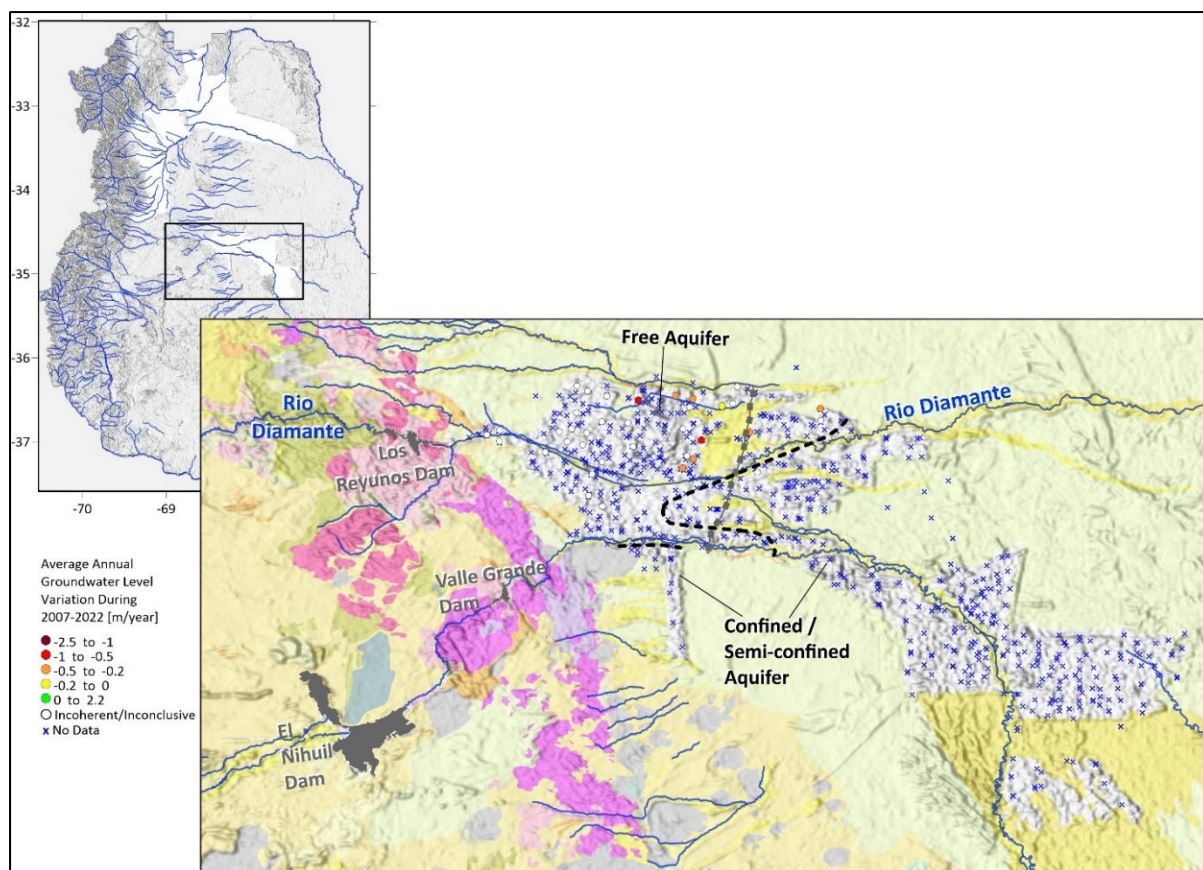


Figura 4-14. Variación promedio anual del nivel freático durante 2007-2022 en las zonas de recarga de la cuenca sur.⁷

4.1.2. ALMACENAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA

La variación del almacenamiento de agua subterránea ΔS es comúnmente:

$$\Delta S = \Delta WL \cdot S_y \cdot A$$

Dónde:

ΔWL es la variación del nivel freático [m] basada en mediciones

S_y es el rendimiento específico [], ya sea basado en datos de pruebas de bombeo o estimado

A es la superficie [m²]

El rendimiento específico de un acuífero confinado se calcula comúnmente utilizando las propiedades de almacenamiento específico y el espesor del acuífero (saturado). Empíricamente, el rendimiento

⁷ Se excluyen los pozos con coeficiente de correlación (R^2) <0,7 (círculos blancos). Entre una cantidad considerable de pozos (signos x), la incompatibilidad de los códigos/nombres de los pozos dificulta cualquier integración de datos antes y después de 2017. La línea gris denota la transición de las partes del acuífero según la clasificación del INA (Tabla 4-1), compatibles con las unidades de manejo (Figura 4-2). La transición de la parte libre del acuífero a su parte confinada/semiconfinada se utiliza en el presente trabajo según la línea negra (ver 4.1.2 Almacenamiento de Agua Subterránea; INA-CRAS, 1981).

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

específico deducido de las pruebas de bombeo incorpora estas propiedades y, por lo tanto, no se requieren exclusivamente para los cálculos de almacenamiento de agua subterránea.

Tabla 4-1: Clasificación de acuíferos por INA, cubriendo las áreas de recarga administradas mapeadas en la Figura 4-2. El rendimiento específico fue modificado y analizado en el transcurso de este trabajo (ver Tabla 4-2).

Cuenca	ACUIFERO	ZONA	TIPO ACUIFERO	Coef almacenamiento	Referencia	Autor
NORTE	MARGEN IZQUIERDA RÍO MENDOZA	Recarga y tránsito	Acuífero Libre y semiconfinado	0.08	IT 146 - 2012	INA
		Tránsito y descarga	Acuífero libre, semiconfinado y confinado			
		Tránsito y Surgencia	Acuífero libre y confinado			
	MARGEN DERECHA RÍO MENDOZA SUBCUENCA EL CARRIZAL	Recarga y tránsito	Acuífero libre, semiconfinado y confinado	0.08	IT-62-2004	INA
		Tránsito y descarga	Acuífero libre y semiconfinado			
	TUNUYAN INFERIOR	TUNUYAN INFERIOR	Recarga y tránsito	Acuífero libre	0.08	IT 146 - 2012
Tránsito			Acuífero libre y semiconfinado			
Tránsito y descarga			Acuífero libre y semiconfinado			
CENTRO	TUNUYAN SUPERIOR	Recarga y tránsito (parte Norte)	Acuífero libre	max 0,09 Ac. Libre (oeste) - 0,001 Ac Conf (este)	Evaluación hidrogeológica de la Cuenca del Río Tunuyán Superior Influencia de eventuales nuevas perforaciones de explotación - 2013	Wetten
		Recarga y tránsito (parte Centro)	Acuífero libre			
		Recarga y tránsito (parte Sur)	Acuífero libre			
		Tránsito, Descarga y Surgencia	Acuífero libre y confinado			
SUR	SUR – RIOS DIAMANTE Y ATUEL	Recarga y Tránsito (R. Diamante)	Acuífero libre		Particularidades de las Cuencas Hidrogeológicas explotadas con fines de riego en la Provincia de Mza	Hernandez - Martini - INA
		Recarga y Tránsito (R. Atuel)	Acuífero libre			
		Tránsito y Descarga (R. Diamante)	Acuífero libre y semiconfinado			
		Tránsito y Descarga (R. Atuel)	Acuífero libre y confinado			

Según información de la DGI, los acuíferos funcionan en su mayoría como un sistema multiacuífero de niveles continuos de agua subterránea a lo largo de las distintas partes del acuífero. El rendimiento específico de las cuencas está dado por la clasificación de acuíferos del INA (Tabla 4-1; ver mapa en la Figura 4-2). Hernández y Martinis (2006) sugirieron una división adicional de las cuencas según los tipos de acuíferos. El rendimiento específico de los acuíferos confinados es normalmente al menos un orden de magnitud menor que el de los acuíferos libres. Por esta razón, se espera que el rendimiento específico del área confinada/semiconfinada en el acuífero norte difiera del rendimiento específico del área libre. Se especula que la clasificación del acuífero del INA considera el rendimiento específico del área confinada/semiconfinada en base a los pozos que bombean principalmente desde la sección somera, por lo que se le atribuye un 0,08 (8%) como área libre del acuífero. Como no se dispone de

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

otra información sobre el almacenamiento confinado del acuífero, para la cuenca norte se utilizaron los valores de rendimiento específicos de las áreas libres y confinadas de la cuenca centro.

La clasificación de acuíferos del INA (Cuadro 4-1) no da rendimiento específico para la cuenca sur de Diamante y Atuel. El presente trabajo utiliza datos de pruebas de bombeo de pozos de la cuenca sur (INA-CRAS, 1981) para establecer sus rangos de rendimiento específico. La Figura 4-15 presenta la distribución espacial de estos pozos y el rendimiento específico basado en los datos de las pruebas de bombeo de cada pozo. El rendimiento específico de hasta 0,0011 es evidente en el área sombreada en amarillo, mientras que el rendimiento específico en el área sombreada en azul supera el 0,059. Esta división se alinea con la línea de confinamiento propuesta por INA-CRAS (1981), bastante diferente a la línea recta del fondo que separa las áreas de recarga administradas (ver también Figura 4-2, y línea gris en las Figuras 4-6, 4-14). Con base en estos datos, se decidió en este trabajo utilizar la línea de confinamiento del INA-CRAS (1981; línea negra en la Figura 4-14). En la parte suroeste de la cuenca, una franja estrecha está ocupada por un solo pozo. El rendimiento específico de este pozo sigue el rango de la parte confinada/semiconfinada de la cuenca, aunque no necesariamente indica el tipo de acuífero en esta área. Tal ocurrencia podría implicar un acuífero libre de un entorno pseudoconfinado debido a las propiedades de los sedimentos cerca de sus bordes, particularmente en un área tan estrecha. De cualquier manera, los acuíferos funcionan en su mayoría como un sistema multiacuífero, y la división del área basada en el rendimiento específico tiene como objetivo en este trabajo establecer las variaciones del almacenamiento de agua subterránea. Por lo tanto, el rendimiento específico utilizado aquí es de 0,0081 a 0,059 (0,81% a 5,9%) al oeste de la línea negra en la Figura 4-14, y de 0,0000377 a 0,0011 (0,0037% a 0,11%) al este de ella. Estos valores coinciden muy poco con las estimaciones recopiladas por Irrigación (2022) pero no con el valor de 0,1 utilizada en su trabajo para el cálculo de almacenamiento. Es importante señalar que los valores en la zona oriental son inferiores a los comúnmente aceptados para sedimentos delgados (Chen et al., 2010; Harter, 2005; Izady et al., 2014; Johnson, 1963; Lv et al., 2021). Esta discrepancia resalta la importancia de obtener más información sobre el rendimiento específico en la cuenca sur.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

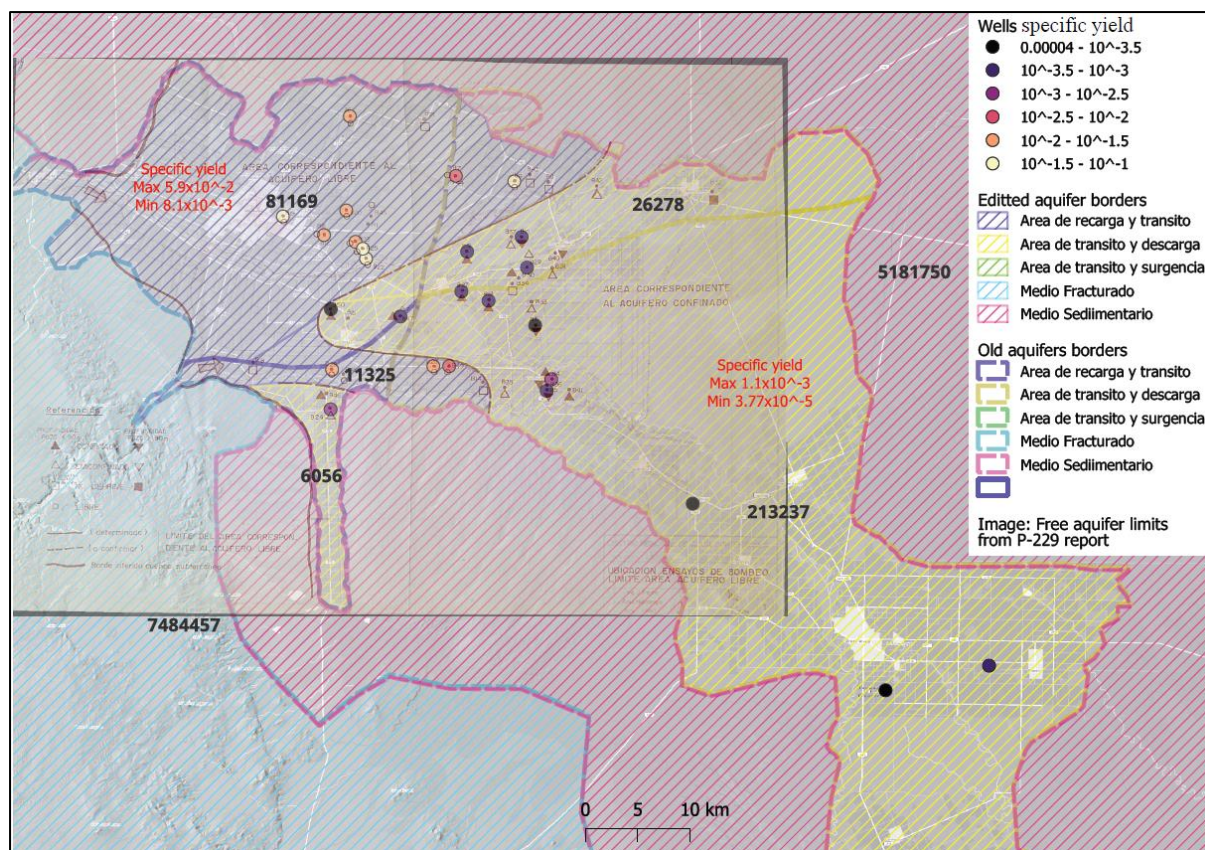


Figura 4-15: Rendimiento específico en la cuenca sur basado en datos de pruebas de bombeo de pozos (INA-CRAS, 1981), en comparación con las áreas de recarga administradas (ver también Figura 4-2 y línea gris en la Figura 4-14). Los rangos generalizados de rendimiento específico para cada área (compuestos por varios polígonos) se indican en rojo. Los números negros indican el área en hectáreas de cada polígono.

El área de superficie está dada por la clasificación del acuífero del INA (Tabla 4-1; ver mapa en Figura 4-2), excepto por modificaciones en la cuenca sur requeridas para ajustarse al rendimiento específico basado en datos de pruebas de bombeo de pozos en la cuenca (INA-CRAS, 1981; Figura 4-15).

Tabla 4-2: Variación de almacenamiento de aguas subterráneas en la provincia de Mendoza entre 2007-2022.

Basin	Aquifer Type		Average Annual GWL Variation [m]	Specific Yield []		Surface Area [km ²]	Average Annual Groundwater Storage Change [MCM]		Cumulative Groundwater Storage Change from 2007 to 2022 [MCM]	
	INA aquifer classification	Hernández and Martinis (2006)		Min.	Max.		Min.	Max.	Min.	Max.
Tunuyán Inferior	Free, Semi-Confined	Semi-Confined, Confined	-0.1	0.001	0.001	4117	-0.03	-0.03	-0.44	-0.44
	Free	Free	Insufficient Data	0.09	0.09	205	?	?	?	?
Margen Izquierda	Free, Semi-Confined	Free	-0.4	0.001	0.09	438	-1.56	-1.56	-23.33	-23.33
Margen Derecha	Free, Semi-Confined, Confined	Semi-Confined, Confined	0.2	0.09	0.09	2180	-0.09	-0.09	-1.29	-1.29
	Free, Semi-Confined, Confined	Free					2.76	2.76	41.45	41.45
Northern basin - Total							1.09	1.09	16.39	16.39
Tunuyán Superior (Valle De Uco)	Free	Free, Semi-Confined, Confined	-0.8	0.09	0.09	2663	-18.82	-18.82	-282.26	-282.26
Tunuyán Superior - Total	Free, Confined	Free, Semi-Confined, Confined		0.001	0.001	833	-0.07	-0.07	-0.98	-0.98
Tunuyán Superior - Total							-18.88	-18.88	-283.24	-283.24
Cuenca Sur (Diamante-Atuel)	Free	Free, Semi-Confined, Confined	-0.4	0.0081	0.059	925	-0.30	-2.21	-4.56	-33.20
Cuenca Sur - Total	Free, Semi-Confined, Confined	Free, Semi-Confined, Confined		0.0000377	0.0011	2456	-0.004	-0.11	-0.06	-1.64
Cuenca Sur - Total							-0.31	-2.32	-4.61	-34.85

*Water levels are based on static measurements during wintertime (from June to August) from 2007 to 2022, spatially averaged for each basin

Averaging of the water levels of Cuenca Sur is of a lower accuracy, due to the limited spatial distribution of the data

**The aquifers in most of the basins work as a multi-aquifer system of continuous water levels throughout the various aquifer parts

***Specific yield of the northern and central basins is of the central basin only, after INA aquifer classification

Specific yield of the southern basin is after pumping test data from wells in the basin (INA-CRAS, 1981)

****Surface area is after INA aquifer classification

Surface area of the southern basin was modified to conform with pumping test data from wells in the basin (INA-CRAS, 1981)

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Las variaciones del almacenamiento de agua subterránea (Tabla 4-2) se calcularon para cada cuenca con base en las variaciones promedio anuales del nivel de agua subterránea de 2007 a 2022 (Figuras 4-12 a 4-14).

Para la Cuenca Norte la variación de almacenamiento anual promedio es de aproximadamente 11 hm^3 y para los 15 años del periodo de tiempo analizado la variación de almacenamiento es del orden de 164 hm^3 . Para esta cuenca las reservas estimadas por el INA son 275.000 hm^3 (IT. 146 -2012). En función de esto, la variación para el periodo de análisis representa un aumento en las reservas de 0,06%, esto se considera una variación insignificante para el volumen de la cuenca.

Si consideramos que la fuente principal de recarga de esta cuenca es el Río Mendoza y para los 11 de los 15 años del periodo de análisis este río tuvo derrames menores a su media histórica, es lógico suponer que las recargas a los acuíferos han sido menores. Al mismo tiempo los distintos acuíferos que componen esta cuenca pueden responder en forma diferenciada a los cambios en el sistema hídrico. Se debe hacer entonces un análisis más detallado de la situación de estos acuíferos, sobre todo considerando la importancia del agua subterránea para la cuenca tanto en el uso agrícola como para el abastecimiento de la población.

Para el Tunuyán Inferior la variación de almacenamiento para el periodo representa una reducción del 0,01% de las reservas estimadas (41.961 hm^3), esta variación no es relevante frente a la magnitud de las reservas.

Para la Margen Izquierda del Río Mendoza, la variación de almacenamiento representa una disminución de 0,75%. Si bien esta variación es muy pequeña comparada con las reservas estimadas para la cuenca se recomienda realizar un análisis detallado para las distintas partes del acuífero donde la variación de niveles pueda comportarse de forma diferente. Si bien el cálculo regional pudo mostrar cierta estabilidad al detallar el nivel del análisis se podrían identificar áreas donde el descenso de niveles sea mayor y pueda afectar a los usuarios, por ejemplo, las zonas de recarga cerca del Río Mendoza.

Para la Margen Derecha del Río Mendoza, la variación de almacenamiento con un aumento de 3,5% para el periodo de análisis. Esta variación es pequeña y se recomienda un análisis más detallado para poder evaluar el comportamiento diferencial de las distintas áreas de esta subcuenca. Los niveles de las perforaciones analizadas en el noroeste de la cuenca, cerca del río, presentan un comportamiento muy variable y correlacionado con la variación del derrame del río, presentando para el periodo de análisis descensos significativos. Las perforaciones ubicadas en la zona sureste de la cuenca presentan a lo largo de los años un comportamiento mucho más estable inclusive con una tendencia positiva en

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

el periodo de análisis (Figura 4-12). En función de esto se recomienda realizar un análisis más detallado de la variación de almacenamiento del agua en la subcuenca para conocer de mejor manera el comportamiento del agua en los distintos sectores. Se busca de esta manera evitar tomar decisiones que puedan afectar a alguno de los usuarios del agua en la cuenca.

Para el Tunuyán Superior la variación de almacenamiento para el periodo de análisis es de -2.832 hm^3 ($-188,8 \text{ hm}^3$ por año en promedio). Este valor representa un 10% de las reservas estimadas para la cuenca que son de 28.000 hm^3 (UNSJ 2013). Esta disminución representa un valor importante frente al volumen de reservas, teniendo su causa principal en la disminución de la oferta hídrica. Si evaluamos el derrame del Río Tunuyán para el periodo de análisis encontramos que solamente 4 de los 15 años presentaron derrames mayores a la media, los otros 11 años fueron valores por debajo de la media historia, ocurriendo entre ellos 3 años de “sequia moderada”, 4 años de “sequia severa” y 2 años de “sequia extrema”. En estos años de sequía se registraron algunos de los valores mínimos históricos para la serie hidrológica del río. La estrecha relación entre el derrame del Río Tunuyán y la variación de almacenamiento fue demostrada por el INA (IT-135, 2012) y si bien el río no es la única fuente de recarga se puede correlacionar su comportamiento con los otros ríos y arroyos de la cuenca que conforman la recarga del acuífero, de la misma manera que con las infiltraciones en el medio fracturado de cordillera. La reducción de la oferta hídrica en la cuenca para la recarga se estima entre un 30% y un 40%.

Para la Cuenca Sur, la variación de almacenamiento calculada para el periodo de análisis varía en función de las referencias utilizadas, esta puede variar entre $-0,1\%$ y $-1,1\%$ de las reservas estimadas para la cuenca de 32.500 hm^3 (Hernández y Martini, 2006). Si bien esta disminución no es significativa comparada con las reservas estimadas en la cuenca se recomienda ejecutar estudios hidrogeológicos en la cuenca de modo de mejorar el conocimiento del comportamiento de los acuíferos y reducir la incertidumbre con respecto a parámetros claves como los coeficientes de almacenamientos.

A continuación, se detallan las inconsistencias o incertidumbres para al cálculo de las variaciones de almacenamiento:

- ✚ Variaciones incoherentes o no concluyentes en el nivel del agua subterránea debido a la falta de puntos de datos a lo largo de los años, la discontinuidad de los valores causada por los efectos de los pozos vecinos que bombean activamente durante las mediciones, o la incompatibilidad de los códigos/nombres de identificación de los pozos. Los datos válidos utilizados para los cálculos dieron como resultado solo entre el 1% y el 13% de los pozos (consulte la distribución espacial en las Figuras 4-12 a 4-14).

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

- ✚ Los supuestos involucrados en establecer el rendimiento específico de cada zona, dadas sus incertidumbres, teniendo en cuenta que los acuíferos funcionan en su mayoría como un sistema multiacuífero con conexiones entre el acuífero libre y el acuífero confinado/semiconfinado.
- ✚ La exclusión de las partes del acuífero que se extienden más allá de las áreas de recarga administradas, donde no existan pozos u otra información.

4.1.3. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los déficits/excesos de almacenamiento de agua subterránea se calcularon de forma independiente utilizando datos del nivel de agua subterránea (ver 4.1.2 Almacenamiento de agua subterránea). Es necesario comparar estos cálculos con los elementos que componen el balance de aguas subterráneas:

- ✚ Recarga superficial natural (por precipitación, considerando evaporación)
- ✚ Recarga natural del subsuelo (a partir de aguas subterráneas)
- ✚ Recarga superficial antropogénica (filtraciones de canales, riego agrícola, embalses, etc.)
- ✚ Salida de manantial natural
- ✚ Extracción de aguas subterráneas

La recarga superficial (natural y antropogénica) utilizada en este trabajo es según Hernández y Martinis (2006). Particularmente para la cuenca centro de Tunuyán Superior, la recarga superficial (natural y antropogénica) y el caudal de manantial natural se calcularon en el transcurso del presente informe como parte del modelo WEAP elaborado por DGI. La extracción de agua subterránea se calculó para todas las cuencas utilizando el mismo modelo. Todos los componentes son válidos para el pasado y el presente, y no consideran los efectos futuros previstos, como el crecimiento demográfico y los cambios climáticos.

Componentes del balance integrados

La Tabla 4-3 desglosa los componentes del balance anual estimado de aguas subterráneas. En la Cuenca Norte, el volumen anual promedio extraído de los acuíferos es de 781 hm³ a lo que se le podría sumar el volumen erogado por algunos manantiales fuera de la zona de oasis. La recarga superficial en la Cuenca Norte es un promedio anual de ~700 hm³ (Hernández y Martinis, 2006), lo que resulta en un déficit general estimado de ~81 hm³, este balance cambia en función de la oferta hidrológica.

Para la Cuenca Centro, si se evalúan las estimaciones realizadas por Hernández y Martinis (2006) se considera una recarga de 845 hm³ y 860 hm³ según el modelo WEAP. Las salidas de agua del acuífero entre erogaciones de los manantiales y de las perforaciones se estiman 819 hm³ (ver Capítulo 4.2). En función de esto el balance da un valor levemente positivo entre 16 a 41 hm³. Si se analiza el balance del acuífero planteado por la UNSJ (2012) en base a la metodología del INA (2000) el acuífero tiene

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

una variación de almacenamiento negativa del orden de los 144 hm³. Este valor es muy similar a la variación de almacenamiento en el acuífero calculada en base a la variación de niveles en la tabla 4.1 cuyo valor es -189 hm³.

En la cuenca sur de Diamante y Atuel, la extracción de agua subterránea se estima en un promedio anual de ~155 hm³, mientras que la recarga asumida es de ~1600 hm³ (Hernández y Martinis, 2006), resultando con un excedente de ~1445 hm³. Esta estimación no tiene en cuenta los volúmenes de agua subterránea erogados por las áreas de surgencia por ejemplo en los distintos tramos de los ríos Diamante y Atuel donde el acuífero le aporta agua al cauce superficial, en el caso de que se pueda definir un volumen para estos aportes el balance en el acuífero se comprobaba que el balance en el acuífero está más cerca del equilibrio tal como fue calculado en la Tabla 4-1.

Tabla 4-3. Componentes del balance anual de aguas subterráneas.⁸

Cuenca	Recarga Anual* [hm ³]		Extracción Anual** [hm ³]	Derrame anual de manantiales*** [hm ³]	Variación anual de almacenamiento - Esperada**** [hm ³]		Variación anual de almacenamiento - Calculada***** [hm ³]	
	Hernández y Martinis (2006)	modelo WEAP			Min.	Max.	Min.	Max.
Cuenca Norte	700	-	781	?	-81		11	
Tunuyán Superior	845	860	467	352	26	41	-189	
Cuenca Sur	1600	-	155	?	1445		-3	-23

*Por irrigación, canales, reservorios, y precipitación. La recarga se considera para toda la cuenca no solamente el área del oasis productivo
 En Tunuyán Superior, el modelo WEAP (datos utilizados de 2007 a 2020) incluye la recarga proveniente de los manantiales en los márgenes de la cuenca
 **Adoptado del modelo WEAP (para la serie 2007 a 2020). Para Tunuyán Superior valor similar al obtenido por el relevamiento de DGI 2018 y 2019
 ***Componente del derrame anual de los manantiales que no es consumido en Tunuyán Superior, adoptado del modelo WEAP (para la serie 2007 a 2020)
 **** Para Tunuyán Superior según la UNSJ (2012) en base a la metodología del INA calculo una variación anual de -144 hm³/año
 *****En base a los niveles de agua subterránea de 2007 a 2022

Almacenamiento de agua subterránea versus balance

Las variaciones del almacenamiento de agua subterránea, calculadas en base a los niveles de agua subterránea (4.1.2 Almacenamiento de agua subterránea), se comparan aquí con las variaciones de almacenamiento esperadas basadas en los componentes del equilibrio integrado. Entre las brechas aparentes entre los dos, la brecha más prominente se encuentra en la cuenca sur, con un superávit esperado de un tercer orden de magnitud, sustancialmente mayor que el déficit calculado en -1 a 0 órdenes de magnitud basado en los niveles de agua subterránea. El excedente esperado es posiblemente menor debido a la falta de consideración de los aportes del agua subterránea a los caudales de los ríos Atuel y Diamante en la zona media de la cuenca; sin embargo, parece poco probable que este flujo alcance tres órdenes de magnitud que lo harían comparable a las variaciones de almacenamiento calculadas utilizando los niveles de agua subterránea. Esta brecha plantea la

⁸ Las variaciones de almacenamiento esperadas basadas en los componentes de entrada y salida estimados se comparan con las variaciones de almacenamiento calculadas con base en los datos del nivel del agua subterránea (ver Tabla 4-2).

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

pregunta de si la recarga superficial (tanto de fuente natural como antropogénica) es de hecho sustancialmente menor que la estimada por Hernández y Martinis (2006).

Una brecha adicional de superávit/déficit es evidente en la Cuenca Norte, con un déficit esperado de $\sim 81 \text{ hm}^3$ en comparación con un superávit calculado de $\sim 1 \text{ hm}^3$. Aunque los niveles de agua subterránea parecen expresar cierto aumento en la parte de la cuenca de Margen Derecha, evidentemente han estado disminuyendo en todo Margen Izquierda y Tunuyán Inferior. Por lo tanto, se especula que el almacenamiento disponible en la cuenca norte ha ido disminuyendo a lo largo de los años como se esperaba por la extracción de agua y la menor recarga superficial, aunque posiblemente a un ritmo más lento que una tasa anual promedio de $\sim 81 \text{ hm}^3$. Otra posibilidad es que la cuenca se esté recargando con el flujo de agua subterránea entrante desde el subsuelo, compensando el componente de extracción. En este caso, la fuente puede estar al oeste de la cuenca en un área de rocas piroclásticas como ignimbrita, toba y piedra pómez (Figura 4-4), donde el río Mendoza cruza a medida que se acerca a la cuenca. Estas rocas posiblemente tengan una alta conductividad hidráulica, lo que permite el flujo subterráneo además del flujo superficial. Sin embargo, se requieren más investigaciones para concluir si el agua subterránea realmente fluye en esta área y recarga el acuífero.

Para la Cuenca Centro, si se evalúan las estimaciones realizadas por Hernández y Martinis (2006) se considera una recarga de 845 hm^3 y 860 hm^3 según el modelo WEAP. Las salidas de agua del acuífero entre erogaciones de los manantiales y de las perforaciones se estiman 819 hm^3 (ver Capítulo 4.2). En función de esto el balance da un valor levemente positivo entre 16 a 41 hm^3 . Si se analiza el balance del acuífero planteado por la UNSJ (2012) en base a la metodología del INA (2000) el acuífero tiene una variación de almacenamiento negativa del orden de los 144 hm^3 . Este valor es muy similar a la variación de almacenamiento en el acuífero calculada en base a la variación de niveles en la tabla 4.1 cuyo valor es -189 hm^3 .

Las diferencias entre el saldo esperado y el saldo calculado se atribuyen a una serie de incertidumbres:

- ✚ Incoherencia/falta de conclusiones sobre los niveles de agua subterránea y ambigüedades específicas en el rendimiento, causadas por varios factores enumerados anteriormente (ver 4.1.2 Almacenamiento de agua subterránea).
- ✚ La distribución desconocida de manantiales en el acuífero más allá de las unidades de manejo, su volumen de salida y trayectorias.
- ✚ En la Cuenca Centro el modelo de recarga considera los aportes de todos los manantiales, aunque algunos de ellos escurren fuera de la cuenca en lugar de infiltrarse.
- ✚ Posibles discrepancias en los valores de recarga superficial (tanto naturales como antropogénicas; según Hernández y Martinis, 2006).

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

- ✚ Exclusión de cualquier posible entrada de agua subterránea desde el subsuelo, como por ejemplo un sistema acuífero profundo que recargue el acuífero superior.

En casos de un balance de agua subterránea negativo constante (ya sea calculado o esperado), el almacenamiento disminuye con el tiempo y es probable que enfrente una crisis potencial. Una crisis de agua subterránea puede implicar una posible disminución en el rendimiento entre los pozos hasta el punto de secarse y/o de un posible riesgo de salinización. Para predecir cuánto tiempo antes de que pueda ocurrir cualquier crisis, es esencial estimar el almacenamiento total de agua subterránea del acuífero. Tal estimación requiere datos disponibles de los pozos en el área de riego, como profundidades de bombeo, propiedades de rendimiento específicas bien establecidas, datos sobre la calidad del agua subterránea, propiedades hidrogeológicas de las unidades que componen la sección profunda, evidencia hidrogeológica de la profundidad total del acuífero en toda el área y las posibles conexiones entre el acuífero libre y el acuífero confinado.

Para cualquier predicción se debe tener en cuenta los impactos futuros del crecimiento demográfico y del Cambio Climático.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

4.1.4. CONCLUSIONES

Para obtener una mejor comprensión del almacenamiento y el equilibrio del agua subterránea y explorar la producción potencial de agua subterránea profunda para prepararse para las próximas décadas, se recomienda enfáticamente:

- ✚ Incrementar la coherencia y continuidad del registro de datos del nivel freático. Esto se puede lograr, por ejemplo, repitiendo las mediciones en períodos cortos de tiempo para su validación, asegurando que las mediciones anuales se realicen en los mismos pozos o manteniendo un registro de la distancia desde cada medición hasta el pozo activo más cercano durante la medición.
- ✚ Adquirir un mayor conocimiento del rendimiento específico en los distintos acuíferos, para reducir sus incertidumbres. Esto puede requerir la realización de pruebas de bombeo exhaustivas.
- ✚ Reunir un registro completo de datos sobre la calidad del agua subterránea (particularmente niveles de CE, cloruro y nitrato) a lo largo de los años.
- ✚ Modelizar la recarga superficial natural y antropogénica en las cuencas norte y sur.
- ✚ Separar la recarga recurrente de manantiales distribuidos en toda el área de la cuenca centro, de la recarga recurrente de manantiales situados en los bordes de la cuenca, para excluir a estos últimos del componente de infiltración en el modelo WEAP.
- ✚ Examinar la distribución de los manantiales más allá de la extensión de las unidades de manejo, su volumen de salida y trayectorias.
- ✚ Explorar posibles entradas de agua subterránea desde el subsuelo, como un sistema acuífero profundo que recargue el acuífero superior.
- ✚ Recopilar información más completa sobre la profundidad de bombeo junto con su distribución espacial en toda el área de los acuíferos.
- ✚ Recopilar datos hidrogeológicos y de calidad del agua de la parte profunda del acuífero, actualmente no utilizada. Dichos datos pueden usarse para arrojar luz sobre las propiedades de la sección profunda, su posible distribución espacial regular/irregular, si es adecuada para la producción de agua subterránea y cuál es el volumen potencial de almacenamiento de agua subterránea de alta calidad.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

4.2. DISPONIBILIDAD DE AGUA SUPERFICIAL

Se presenta a continuación la tabla con los valores de Agua Disponible, esta tabla se presentó en el Informe N°1, Capítulo 8 Disponibilidad de Agua Superficial.

Los valores de los ríos Mendoza, Tunuyán y Malargüe, fueron revisados y corregidos. Corresponden a un ciclo hidrológico de octubre a septiembre.

Tabla 4-4: Valores de agua disponibles actualizados

Año	Mendoza A.D (HM ³)	Atuel A.D (HM ³)	Diamante A.D (HM ³)	Malargüe A.D (HM ³)	Tunuyán A.D (HM ³)	Total A.D (HM ³)
2000-01	1.644	1.269	1.477	475	1.535	6.401
2001-02	1.575	1.358	1.516	466	1.699	6.614
2002-03	1.622	1.480	1.774	442	1.817	7.135
2003-04	1.464	1.034	1.086	263	1.304	5.151
2004-05	1.066	919	985	371	1.195	4.535
2005-06	2.300	1.637	1.846	627	2.123	8.535
2006-07	1.923	1.342	1.417	397	1.684	6.763
2007-08	1.451	927	1.017	320	1.380	5.094
2008-09	1.868	1.049	1.161	346	1.655	6.078
2009-10	1.431	943	1.106	297	1.343	5.119
2010-11	849	627	705	149	1.035	3.364
2011-12	1.004	681	715	187	1.078	3.665
2012-13	1.049	692	840	192	1.133	3.905
2013-14	1.089	579	711	146	1.189	3.714
2014-15	940	567	660	132	1.069	3.367
2015-16	1.309	777	1.027	340	1.691	5.144
2016-17	1.517	809	989	204	1.468	4.989
2017-18	1.030	611	718	142	993	3.495
2018-19	950	594	676	149	973	3.341
2019-20	857	474	526	140	812	2.787
2020-21	910	569	666	190	1.101	3.388

4.3. AGUA TRATADA

Como se describe en el informe 1.1 capítulo 12.4 (Plantas de Tratamiento de efluentes y A.C.R.E. asociados), "La provincia cuenta con 42 Plantas Depuradoras de aguas residuales en funcionamiento. En conjunto, estas plantas depuradoras tratan un volumen diario de 358.900 m³/día de efluentes cloacales provenientes en su mayoría del Área Metropolitana".

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 4-5: Capacidad real del agua tratada

Cuenca	Estación depuradora	Operador	Tipo de Tratamiento	Volumen (Hm ³ /año)
Mendoza	El Algarrobal	Sin Operador	Primario - Laguna	0,13
	Campo Espejo	AYSAM S.A.	Secundario - Lagunas	46,69
	Complejo Penitenciario Almafuerite	Penitenciaria	Secundario - Lagunas	0,33
	Colonia Segovia	Municipio de Guaymallén	Secundario - Lagunas	0,72
	Costa de Araujo	AYSAM S.A.	Secundario - Lagunas	0,41
	Villa Tulumaya	AYSAM S.A.	No hay tratamiento	0,41
	Las Cuevas	AYSAM S.A.	Primario Cámara Séptica	0,02
	Penitentes	AYSAM S.A.	Primario Cámara Séptica	0,08
	Pte. del Inca - Horcones	AYSAM S.A.	Primario Cámara Séptica	0,11
	Polvaredas	AYSAM S.A.	Primario Cámara Séptica	0,05
	Punta de Vacas	AYSAM S.A.	Primario Cámara Séptica	0,08
	Potrerillos	AYSAM S.A.	Secundario - Lodos Activados	0,21
	Uspallata	AYSAM S.A.	Secundario - Lagunas	1,20
	El Paramillo	AYSAM S.A.	Secundario - Lagunas	55,29
	Fray Luis Beltrán	Municipio de Maipú	Primario Cámara Séptica	0,16
	Agrelo	Municipio de Luján de Cuyo	Secundario - Lagunas	0,38
	Total			106
Tunuyán Superior	Estación depuradora	Operador	Tipo de Tratamiento	Volumen (Hm³/año)
	Tupungato	Municipio de Tupungato	Secundario Biodiscos- Aireación extendida	1,34
	Vista Flores	Cooperativa Eléctrica	Secundario - Lodos Activados	0,63
	San Carlos	AYSAM SA	Primario - Laguna	0,74
	Tunuyán	AYSAM SA	Secundario - Lagunas	1,71
	Colonia Las Rosas	AYSAM SA	Primario - Biodigestor	0,01
	Total			4
Tunuyán Inferior	Estación depuradora	Operador	Tipo de Tratamiento	Volumen (Hm³/año)
	Rodríguez Peña	Municipio de Junín	Secundario - Lodos Activados	0,08
	Ing. Giagnoni	Municipio de Junín	Secundario - Lodos Activados	0,26
	Palmira	AYSAM S.A.	Secundario - Lagunas	1,32
	Los Barriales	Unión Vecinal Los Barriales	Secundario - Lagunas	0,32
	Junín	AYSAM S.A.	Secundario - Zanja de oxidación	0,59
	Los Otoyanes	Municipio de Junín	Secundario - Lodos Activados	0,06
	San Martín	AYSAM S.A.	Secundario - Lagunas	5,80
	La Central	Unión Vecinal de La Central	Secundario - Lodos Activados	0,11
	La Libertad	Municipio de Rivadavia	Secundario - Lagunas	0,11
	La Paz	AYSAM S.A.	Primario - Laguna	0,27
	Los Campamentos	Unión Vecinal Gargantini	Secundario - Lodos Activados	0,10
	Rivadavia	AYSAM S.A.	Secundario - Lagunas	2,60
	Santa Rosa	AYSAM S.A.	Secundario - Lagunas	0,08
Total			12	
Diamante	Estación depuradora	Operador	Tipo de Tratamiento	Volumen (Hm³/año)
	Villa 25 de Mayo	Municipio de San Rafael	Secundario - Lodos Activados	0,16
	Unidad Penitenciaria X El Cerrito	Provincia de Mendoza	Secundario - Lodos Activados	0,04

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

	Cuadro Nacional	AySAM SA	Secundario - Lagunas	4,64
	Total			5
Atuel	Estación depuradora	Operador	Tipo de Tratamiento	Volumen (Hm³/año)
	Gral. Alvear	AYSAM S.A	primario - laguna	2,24
	Bowen	C.O.S.P.A.C.	secundario - lagunas	0,51
	El Nihuil	Municipio San Rafael	secundario - lagunas	0,07
	Valle Grande/Cañón del Atuel	Sin operador	secundario - lagunas	0,49
	Real del Padre	Cooperativa Rural de Servicios y Vivienda Real del Padre	primario - laguna	0,21
	Valle Las Leñas	Operador Privado	secundario – lodos activados	0,23
	Los Molles	Operador Privado	secundario – planta compacta	0,01
	Total			3,76
	TOTAL			<u>131</u>

Potencial total de agua tratada con las instalaciones existentes: 131 Hm³/año.

5. INFORME SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO

5.1. RESUMEN EJECUTIVO

El propósito del presente estudio es cuantificar los efectos de los cambios en el clima en las condiciones hidrológica de la provincia de Mendoza, en particular sobre la oferta de los recursos hídricos. El estudio analiza los cambios esperados en el ciclo hidrológico para la precipitación, evaporación, escorrentía, cobertura de nieve, humedad del suelo y derrame de los ríos mediante el uso de un enfoque novedoso y modelos de vanguardia. Esto permitirá evaluar el agua disponible en el futuro en la provincia.

Los resultados del estudio muestran una clara tendencia de calentamiento y aumento de la aridez en la provincia de Mendoza. Los modelos indican una señal robusta de disminución en la precipitación invernal sobre las montañas de los Andes, siendo esta área la que contribuye con la mayor parte del agua a las estribaciones semiáridas de la provincia. Se espera que la disminución de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas conduzcan a una disminución significativa de la capa de nieve que se acumula en los Andes y, como resultado, menores volúmenes de agua en los ríos de la provincia.

Se espera además un aumento en la demanda de agua de todos los sectores, especialmente en la agricultura debido a un incremento en las condiciones de aridez provocada por mayores tasas de evaporación y menor humedad en el suelo.

Por otro lado, una tendencia positiva de precipitación en las zonas de llanura, principalmente en las estaciones relativamente cálidas. Sin embargo, este aumento de las precipitaciones en la región semiárida difícilmente afecte los balances de recursos hídricos en la provincia. En todo caso debido a

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

las mayores intensidades de las precipitaciones se producirán daños provocados por inundaciones repentinas.

En resumen, se espera que los recursos hídricos de la provincia disminuyan alrededor del 8% en 2030, -13% en 2050 y -25% hasta 2070, como se puede ver en la Figura 1 y la Tabla 1. La comparación del agua disponible en el futuro esperado en la provincia con un período de control de 10 años de clasificación de 2000-2010 que no incluye la reciente sequía severa, revela que la disminución del agua disponible en 2050 será de alrededor del 27-30%.

⁹Un reciente estudio complementario realizado por "IANIGLA", el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales bajo el nombre "Clima y proyecciones climáticas del abastecimiento de agua para la próxima década en la provincia de Mendoza" (Toum, Rivera y Viale, agosto de 2023) llegó a los mismos hallazgos y llegó a las mismas conclusiones respecto a las tendencias hidrometeorológicas en la provincia. Su importante y detallado estudio también utilizó modelos climáticos e hidrológicos y encontró la misma disminución significativa en el flujo de corriente esperado en 2050 en la provincia (25% -30%). Encontramos su esfuerzo científico de modelado altamente valioso e importante. Sus resultados dan más credibilidad a las conclusiones proporcionadas en este informe.

Afirmamos que la provincia de Mendoza se verá afectada por tendencias de cambio climático similares a las de otras regiones ubicadas en el lado negativo de la circulación global de la célula de Hadley alrededor de las latitudes 30 en el norte y sur de Hampshire.

La disminución significativa esperada en el agua disponible, además del aumento de la evaporación, conducirá a un aumento en las demandas de riego para la agricultura con respecto a las condiciones actuales. En años secos la provincia no podrá abastecer la cantidad actual de agua para satisfacer las demandas de todos los sectores.

⁹ "PROYECCIONES DEL CLIMA Y DE LA OFERTA HÍDRICA PARA LAS PRÓXIMAS DÉCADAS EN LA PROVINCIA DE MENDOZA" - Se adjunta copia digital del informe.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

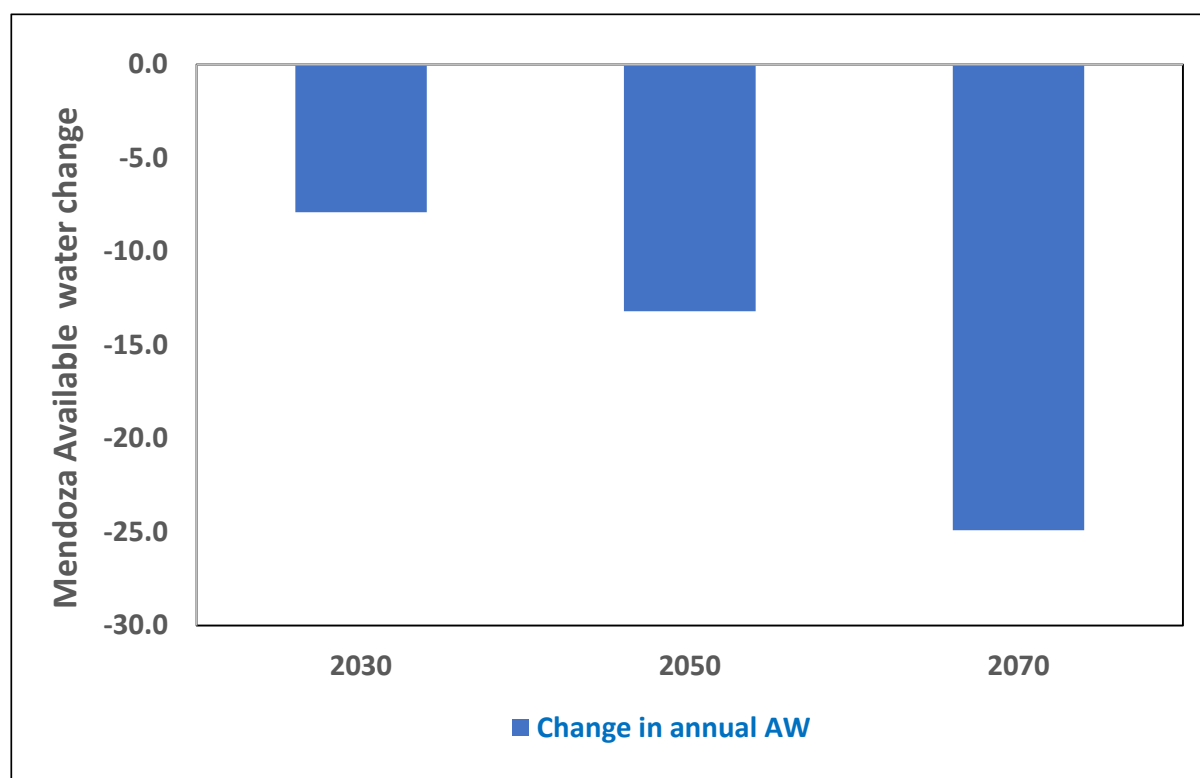


Figura 5-1: Cambios esperados (%) en los volúmenes de agua disponibles de Mendoza para los períodos 2030, 2050 y 2070 con respecto al período de referencia de 2000-2020

Tabla 5-1: Cambios previstos en el agua disponible superficial en la provincia de Mendoza para los diferentes períodos con respecto al período 2000-2020

Periodo	Promedio anual de AW en Mendoza (HM ³)	Cambio (%) con Respecto a 2000-2020
2000-2020	4.888	
2030	4.502	-7,90%
2050	4.243	-13,20%
2070	3.671	-24,90%

5.2. INTRODUCCIÓN

La región central de los Andes donde se ubica la provincia de Mendoza se caracteriza por una fuerte influencia de la topografía en el clima regional y local. Se pueden diferenciar dos subregiones distintas en términos de estacionalidad de las precipitaciones, la Cordillera de los Andes y las Tierras Bajas (ver Figura 1). Este sector de la cordillera de los Andes se caracteriza por una anchura estrecha, una orientación norte-sur centrada en los 70°O y una elevación media de ~4.500 m con picos que pueden superar los 6.000 msnm. La precipitación sobre esta región montañosa tiene un régimen mediterráneo, concentrándose principalmente durante la estación fría (abril a septiembre) y una estación cálida seca (octubre a marzo) en respuesta al desplazamiento estacional de la Alta del Pacífico Sudeste. Por otro lado, la región de Tierras Bajas se caracteriza por un régimen de precipitaciones

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

monzónicas, con una estacionalidad más marcada cerca del piedemonte andino (Doyle, 2020). Debido al marcado efecto de sombra de la lluvia, el clima en las tierras bajas es árido a semiárido en el oeste y subhúmedo en el este, con lluvias convectivas en la estación cálida.

La provincia de Mendoza se divide en cuencas principales: Mendoza, Diamante, Atuel, Malargüe y Tunuyán (ver figura 5-2).

La provincia de Mendoza depende del agua que provienen de la Cordillera de los Andes, el agua superficial que traen sus ríos cumple un rol fundamental en la gestión de los recursos hídricos. La mayor parte del agua utilizada para el desarrollo de las principales actividades socioeconómicas proviene de los ríos que tienen su origen en la nieve de la cordillera.

Las observaciones a largo plazo han mostrado tendencias negativas de precipitación a lo largo de los Andes en general y la región de Mendoza en particular (Rivera y Arnould, 2020), lo que favoreció una pérdida sostenida de masa glaciar en las elevaciones más altas de la cordillera de los Andes (Dussailant et al., 2019), se observan, además, tendencias positivas de precipitación en la región de llanura (Maenza et al., 2017; Rivera y Arnould, 2020). Durante la última década (2010-2020), la reducción de la acumulación de nieve en las elevaciones más altas de la Cordillera de los Andes desencadenó la aparición de sequía hidrológica en la provincia (Rivera et. al, 2021).

El promedio anual de agua disponible en la provincia de Mendoza es 4.888 millones de metros cúbicos para el período 2000-2021. Se aprecia claramente que el agua disponible está disminuyendo drásticamente con el paso de los años si se comparan los años correspondientes al inicio del periodo con los del final de este.

Los cambios climáticos afectan la disponibilidad de recursos hídricos de varias maneras: una disminución de los recursos hídricos naturales (precipitaciones, caudales), un aumento en la frecuencia, duración e intensidad de las sequías, por otro lado, un aumento de la evaporación y la demanda de agua para todos los sectores, especialmente para agricultura. Para gestionar los recursos hídricos de manera eficiente en un clima cambiante, se necesitan proyecciones hidro-climáticas futuras en el tiempo y el espacio. El propósito de este trabajo es cuantificar los efectos hidro-climáticas esperados sobre la disponibilidad de agua en la provincia de Mendoza. La principal metodología utilizada en este estudio es la aplicación de resultados de modelos climáticos e hidrológicos de alta resolución para los próximos años y décadas con respecto a las condiciones climáticas de referencia. Esta información cuantitativa permitirá evaluar el riesgo potencial en términos de recursos hídricos en esta región bajo un clima cambiante.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

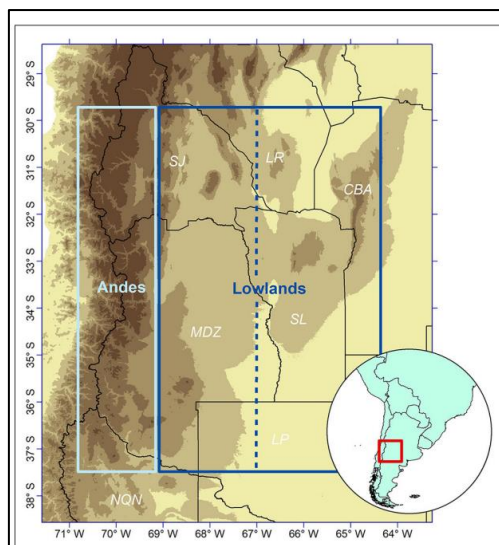


Figura 5-2: La Cordillera de los Andes en la provincia de Mendoza, Fuente: Rivera y Arnould, 2020

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

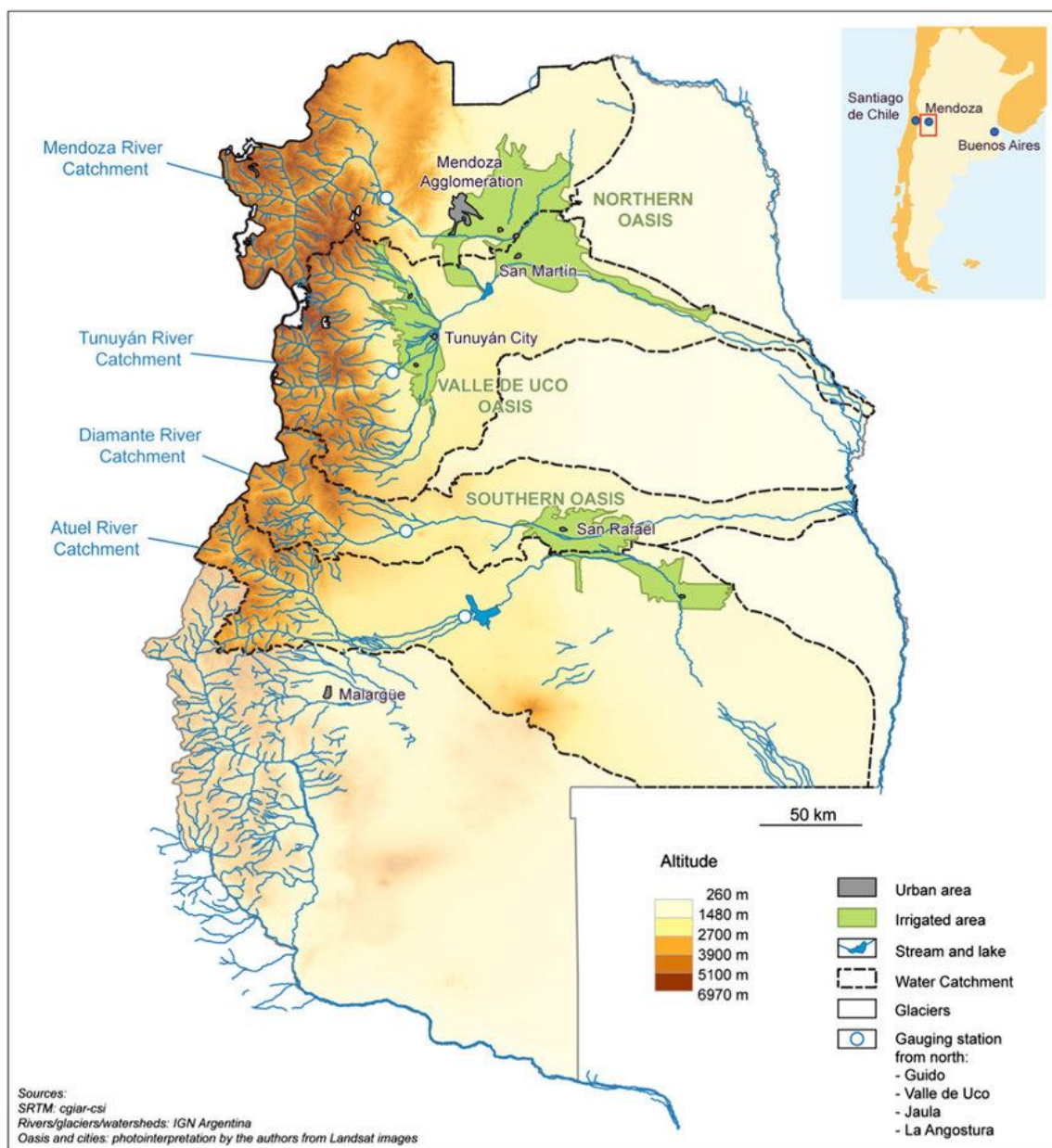


Figura 5-3: Los principales ríos de la provincia de Mendoza

5.3. METODOLOGÍA

El propósito de este estudio es cuantificar las condiciones futuras del clima y la hidrología de Mendoza para calcular la disponibilidad futura de agua en la provincia. Con el fin de evaluar los impactos proyectados del cambio climático en los recursos hídricos de Mendoza, se evalúan datos climáticos globales y regionales. Se analizan, además, modelos hidrológicos para un período de referencia (históricamente 30 años), así como también para mediados y finales del siglo XXI. El análisis incluyó proyecciones climáticas y tendencias de diversas variables que afectan el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua del país, como la precipitación total, los cambios en los patrones de precipitación, la temperatura máxima, la evapotranspiración, la humedad del suelo, la escorrentía y los derrames y caudales de los ríos.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

En este estudio se eligió el escenario climático RCP8.5 del IPCC (un gráfico de emisiones de gases de efecto invernadero comparativamente altas). La adopción del escenario climático RCP8.5 del IPCC se basa en que si bien hace unos años era considerado como un escenario “pesimista” a la fecha las tendencias climáticas pronosticadas por otros escenarios menos extremos ya fueron superadas.

Para el estudio, se utiliza la media conjunta de cinco modelos regionales para reducir las incertidumbres relacionadas con los modelos. Se analizaron las tendencias hidro-climáticas futuras versus los resultados históricos de referencia (2020-2040 y 2040-2070 con respecto al período 1970-2000). Posteriormente, se calcula el cambio relativo entre los períodos futuros y el período de referencia para cada variable del período futuro. La resolución de la cuadrícula espacial de los modelos climáticos fue de 20 km².

El conjunto completo de variables Hidro-climáticas contiene análisis de anomalías para los siguientes parámetros:

- ✚ Temperaturas (Temperaturas medias anuales, Mínimas y Máximas)
- ✚ Evaporación potencial anual
- ✚ Cantidades de precipitación anual y desviación estándar de precipitación
- ✚ El índice de sequía (SPEI) para diferentes escenarios climáticos
- ✚ Nevadas acumuladas para diferentes evaluaciones en las partes altas de la vertiente oriental de los Andes
- ✚ Los caudales esperados mensuales y anuales en la provincia.
- ✚ Volúmenes de agua disponibles futuros en las provincias respecto a la situación actual
- ✚ Se simuló caudales anuales de 5 ríos de la provincia (agua disponible) con base en el modelo empírico desarrollado en este estudio y se utilizan variables meteorológicas como predictores del caudal:
 - A. Profundidad del manto de nieve en zonas altas de las cuencas hidrográficas (4.000 metros, (año actual y anterior).
 - B. Temperaturas (media y máxima anual)
 - C. Precipitación

Las producciones anuales del caudal interanual (décadas) se basan en los modelos hidrológicos HYPE y VIC (Lindström et al., 2010).

Los modelos climáticos regionales reducidos utilizados en este estudio tienen una resolución de hasta 20 kilómetros del grupo de trabajo “HighResMip”, que forma parte del proyecto IPCC CMIP6. En este estudio utilizamos datos para analizar la temperatura, la evaporación y la precipitación de un conjunto

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

de 5 modelos climáticos diferentes para el período 1950-2050 (consulte los detalles de los modelos climáticos en la Tabla 5-2).

Además de los indicadores climáticos de los modelos, en este estudio se seleccionaron indicadores de sequía cuantitativos y mensurables para analizar las condiciones climáticas futuras en Mendoza. Dichos indicadores/índices que contienen series temporales de largo plazo pueden mostrar tendencias y permitir analizar el clima futuro esperado con respecto a sus promedios de largo plazo (período de referencia).

Para cuantificar los cambios en los patrones de precipitación y no solo las cantidades totales anuales, se analizaron las tendencias de las desviaciones estándar diarias y anuales.

Tabla 5-2: Modelos climáticos globales y regionales que se utilizaron en el estudio

Nombre del Modelo Global	Nombre del Modelo Regional	Fuente de Datos del Modelo
EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	Netherlands meteorological service
EC-EARTH	SMHI-RCA4	Swedish meteorological service
HadGEM2-ES	SMHI-RCA4	Swedish meteorological service
CM5A	IPSL-WRF33	U.S National Center for Atmospheric science
MPI-ESM-LR	CSC-REM	Max Planck Institute, Germany

5.4. RESULTADOS

5.4.1. TENDENCIAS EN LOS PARÁMETROS HIDRO-CLIMÁTICAS

Temperatura y evaporación

Las Figuras 5-4 a 5-8 muestran los cambios esperados (anomalía) para los principales parámetros hidro-climáticos en la provincia de Mendoza. Los resultados muestran los cambios para el periodo 2020-2040 respecto al periodo base de 1970-2000. Las figuras 5-4 y 5-5 muestran el aumento esperado de las temperaturas medias (3) en las próximas décadas, mientras que la figura 5-5 muestra el mínimo anual. y temperaturas máximas en los Andes de Mendoza a una altura de 5.126 m.

En la figura 5-4 se puede ver que se espera que las temperaturas aumenten en la provincia más que en muchas otras regiones de Argentina. La temperatura mínima en las zonas altas de los Andes aumentará rápidamente (figura 5-5), a un ritmo mayor que la temperatura promedio, lo que significa un mayor derretimiento de la nieve en las próximas décadas.

Las Figuras 5-6 muestran el resultado esperado del aumento de la precipitación: una tendencia creciente en la evaporación. Puede verse, por ejemplo, que se espera que la evaporación potencial

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

anual en la región de los Andes, a una altura de 1.665 m, aumento de alrededor de 1.000 mm a alrededor de 1.100 mm por año para 2050.

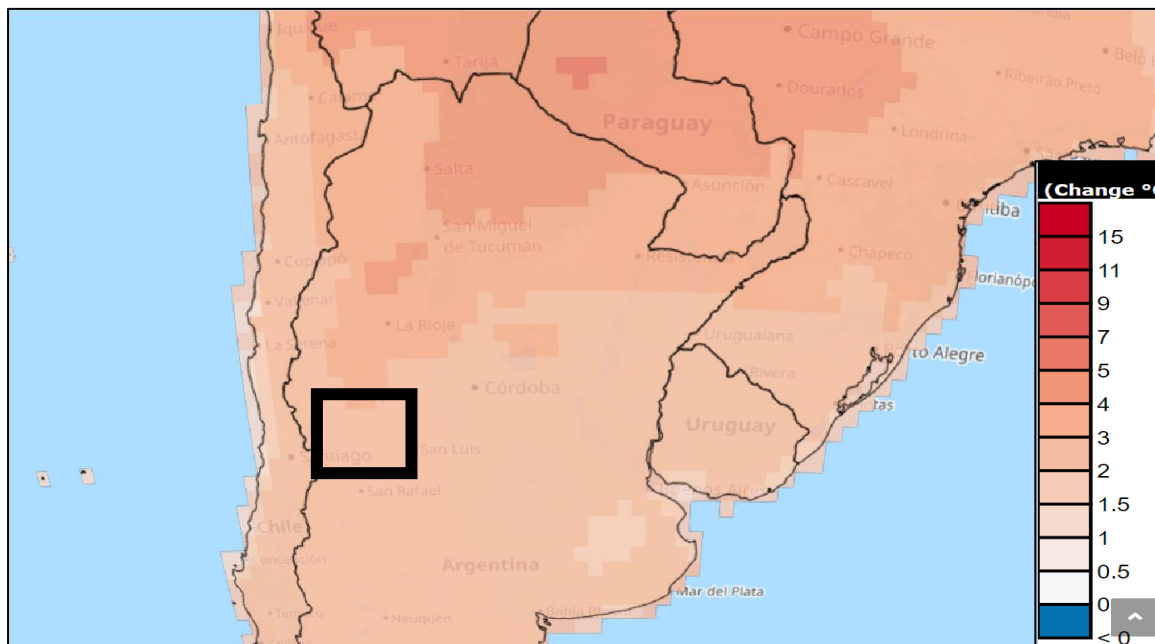


Figura 5-4: Anomalía de las temperaturas medias para el periodo 2020-2040 respecto a la línea base

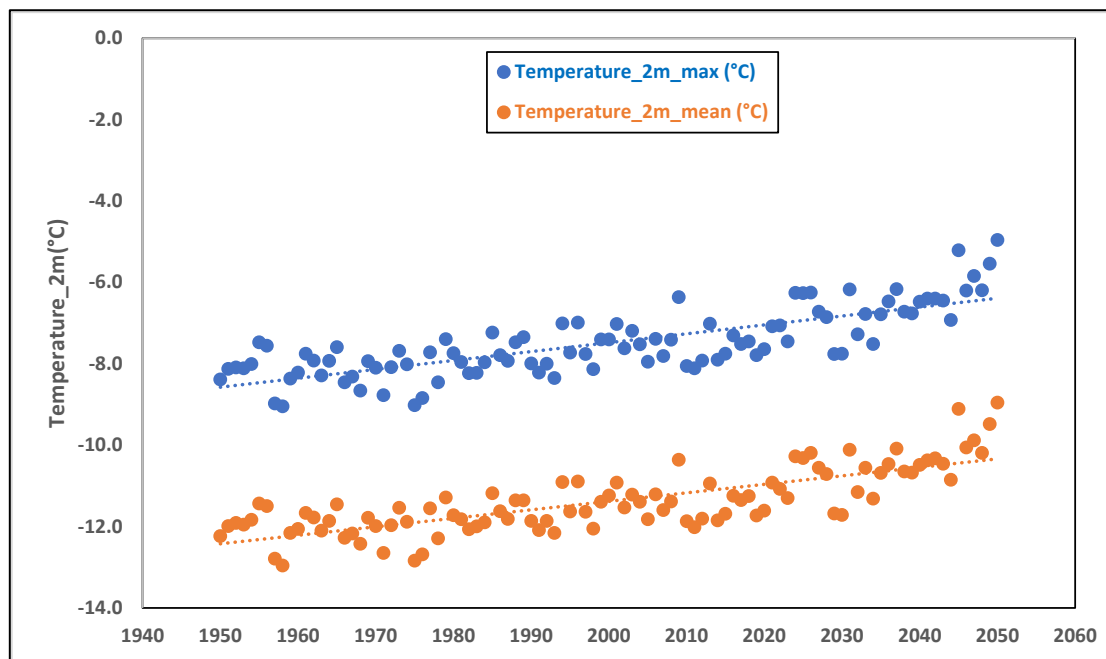


Figura 5-5: Media (naranja) y máx. (azul) tendencia de las temperaturas anuales en los Andes de Mendoza, 5126 m

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

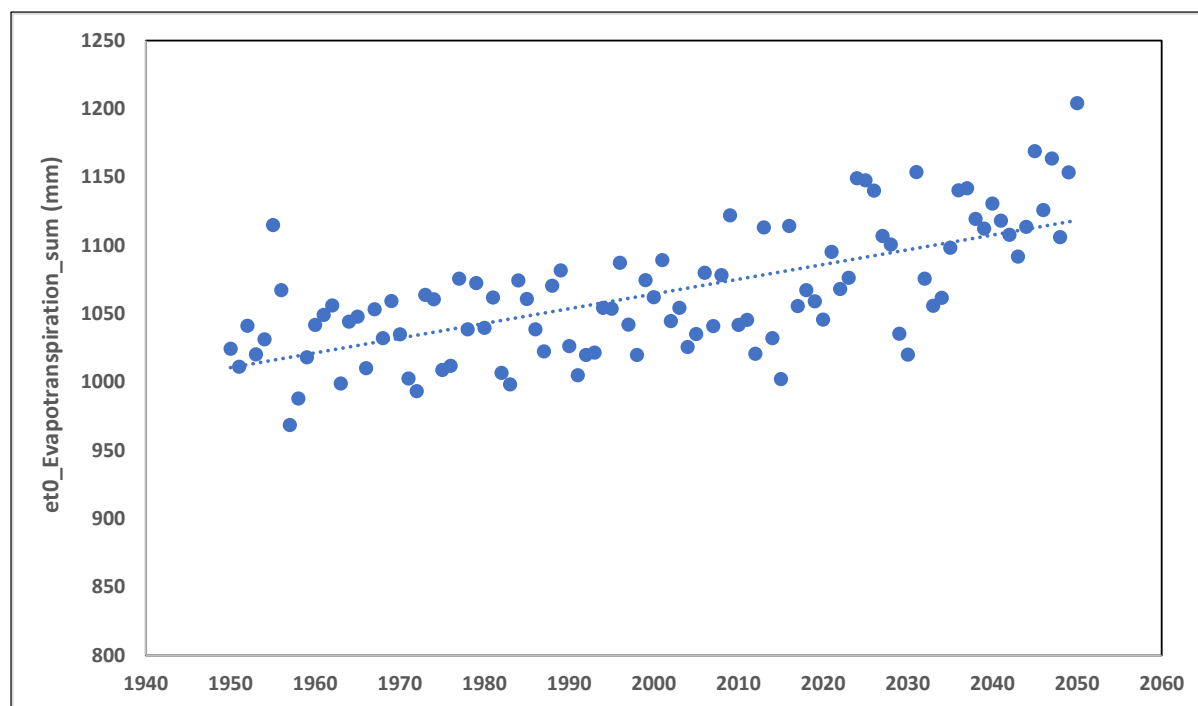


Figura 5-6: Evaporación anual en Mendoza, elevación 1665 m

Precipitación

La Figura 5-6 muestra la anomalía de precipitación total en la región de los Andes argentinos para el período 2030-2050 con respecto a la línea base 1970-2000. Se puede observar que se espera que la precipitación anual en el área de Mendoza disminuya alrededor de un 10% en toda la cordillera de los Andes, especialmente en las zonas altas de la provincia de Mendoza (en el rectángulo negro en la Figura 5-7 y en la Figura 5-8). para el periodo 2020-2040. La Figura 5-9 muestra la anomalía de precipitación mensual (%) para el período 2030-2039 con respecto a la línea base 1995-2014. Se puede observar que la disminución de las precipitaciones en los Andes se dará mayoritariamente durante los meses de invierno y primavera. Las cantidades de precipitación anual y mensual son un componente importante del ciclo hidrológico y de la gestión de los recursos hídricos, pero por importante que sea, no es el único factor que debe analizarse. Un análisis adicional que puede ayudar a comprender el comportamiento y la propagación de las precipitaciones futuras son los valores de precipitación de la desviación estándar (STD). La Figura 5-10 muestra la desviación estándar de precipitación anual simulada para Mendoza (regiones de gran elevación) de 1950 a 2050. Se puede observar que la STD está aumentando a lo largo de los años desde alrededor de 84 mm/año en el período de referencia de 1950 a alrededor de 139 mm. en 2050. Esta tendencia esperada significa una mayor variabilidad interanual de las precipitaciones en Mendoza y por ende de la disponibilidad de agua. Un aumento en las desviaciones estándar significa que podemos esperar tener años más húmedos extremos junto con años secos en Mendoza en las próximas décadas.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

La sequía es un factor importante en la gestión de los recursos hídricos. La información sobre la frecuencia, duración e intensidad previstas de las sequías es muy importante para los sectores de la agricultura y el agua. El Índice Estandarizado de Evapotranspiración y Precipitación (SPEI) es un indicador de sequía, que calcula la sequía basándose en la desviación estándar de la precipitación acumulada de la media a largo plazo, incluida la evapotranspiración. Los valores positivos indican condiciones de equilibrio hídrico positivo (o humedad) y los valores negativos indican condiciones de equilibrio hídrico negativo (o sequía). Este indicador muestra la frecuencia e intensidad de las sequías observadas en 12 meses (períodos de acumulación). Los índices de sequía, como el SPEI, suelen calcularse en diferentes escalas temporales para adaptarse a los diferentes tiempos de respuesta de los sistemas afectados por la sequía. Este indicador excluye otros factores que influyen en la sequía, como la geología y los suelos, el caudal de los ríos, el derretimiento de los glaciares y la evapotranspiración. La Figura 5-12 presenta el índice de sequía del SPEI en diferentes escenarios climáticos para la provincia de Mendoza. Los resultados muestran la media conjunta de todos los modelos globales CMAP6 del IPCC (los modelos climáticos más actualizados disponibles). Se puede observar que según el índice SPEI se espera que las condiciones de sequía sean más frecuentes y dominantes en la provincia.

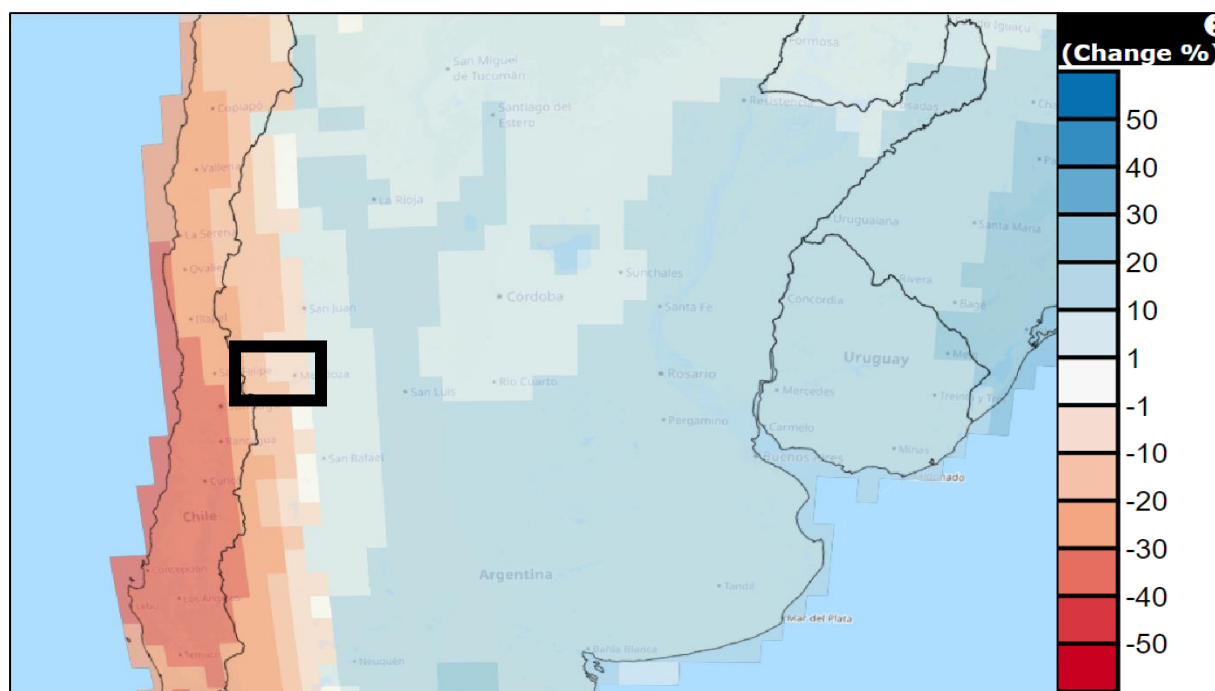


Figura 5-7: Anomalía de precipitación (%) para el período 2030 - 2050 con respecto a la línea base 1970-2000.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

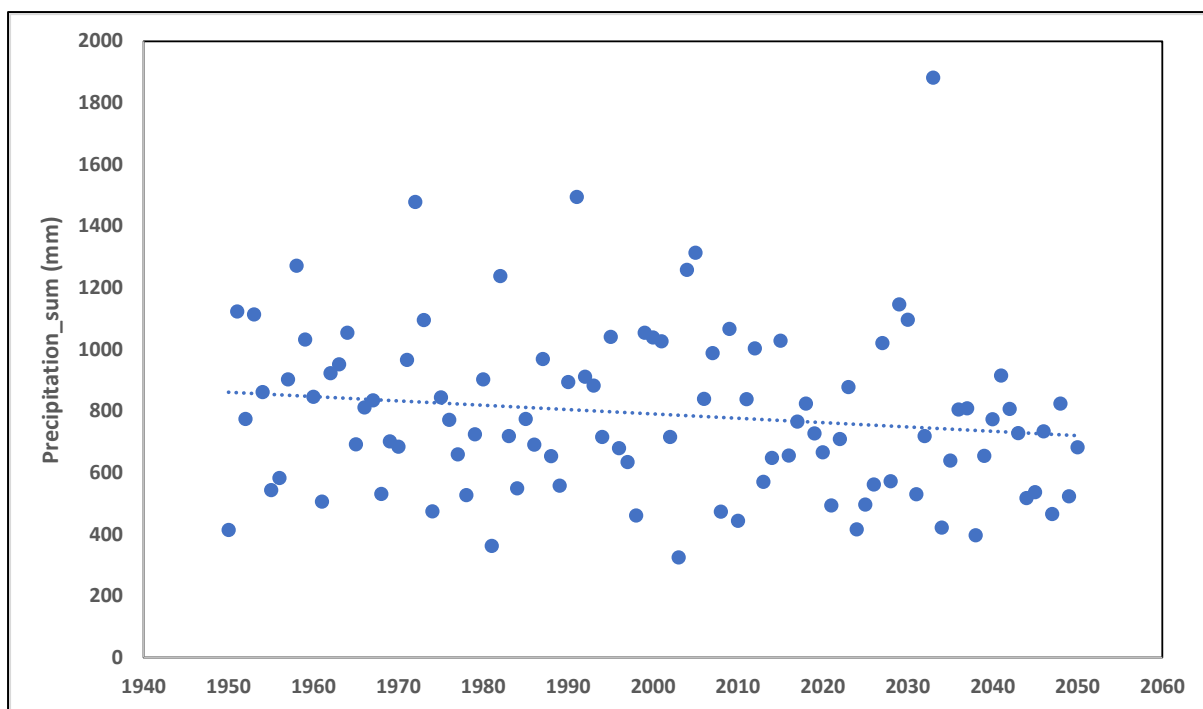


Figura 5-8: Precipitación anual simulada en las regiones andinas de gran altitud en Mendoza

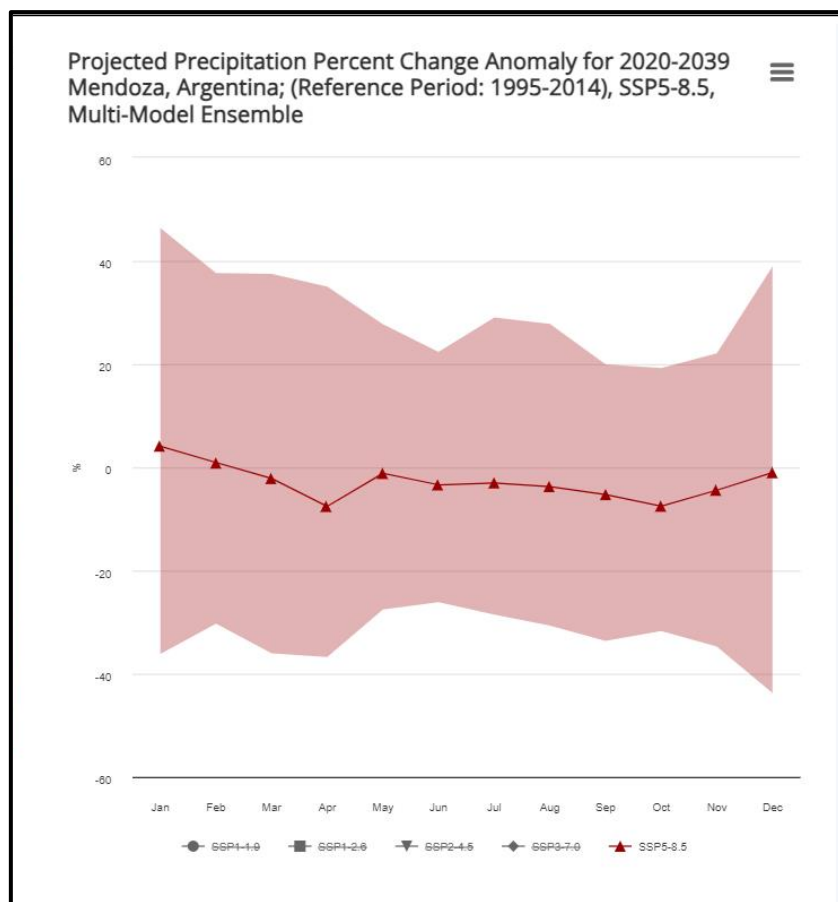


Figura 5-9: Anomalía de precipitación mensual (%) para el periodo 2030-2039 respecto a la línea base 1995-2014.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

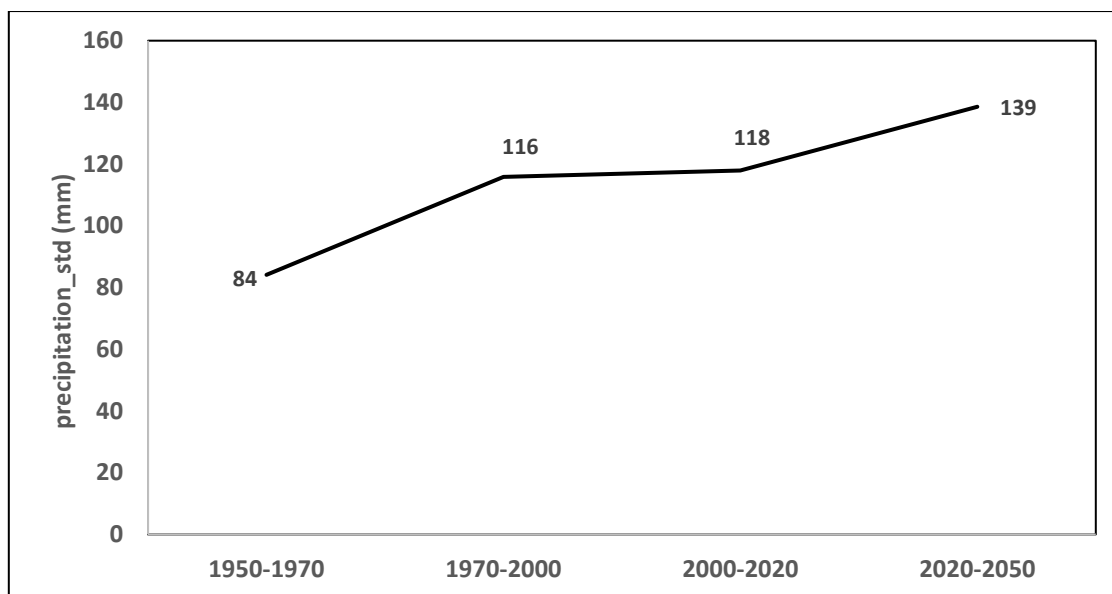


Figura 5-10: Desviación estándar de precipitación anual para Mendoza (regiones de gran altitud)

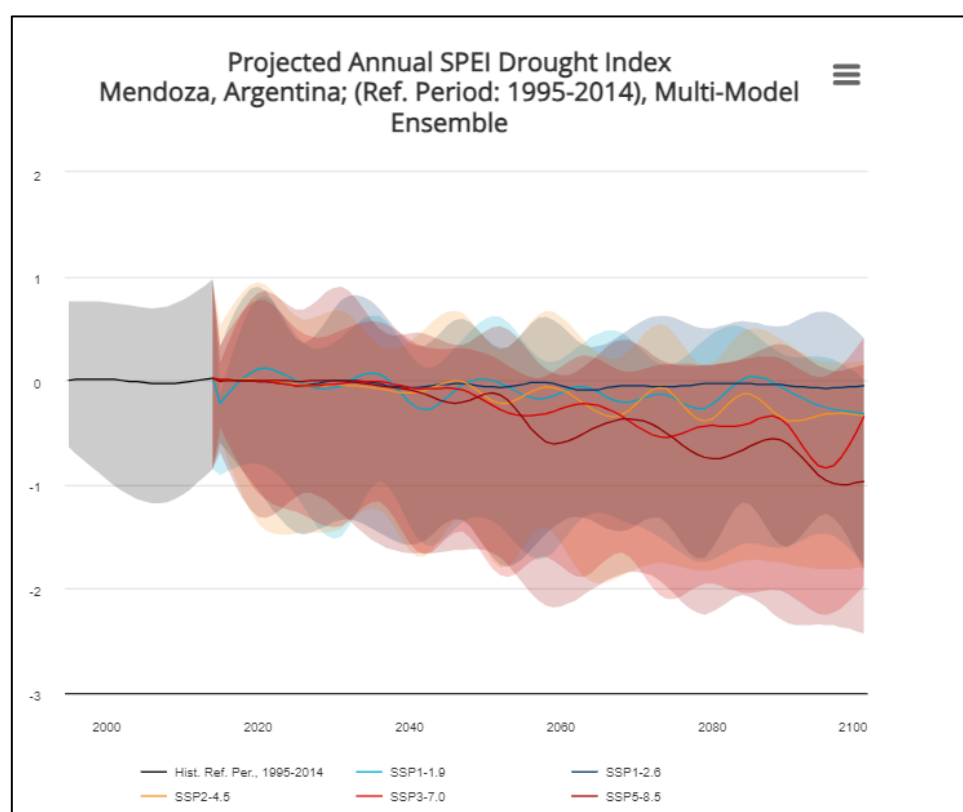


Figura 5-11: El índice de sequía SPEI (precipitación y evaporación) para diferentes escenarios climáticos para Mendoza

Nieve

La acumulación de nieve en los Andes es el principal recurso hídrico de la provincia de Mendoza. El deshielo alimenta el caudal que drena desde las laderas occidentales de los Andes río abajo. Los

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

efectos combinados del aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones ya provocaron una disminución de la acumulación de nieve en los Andes y se espera que continúen disminuyendo. La Figura 5-12 muestra la tendencia de acumulación de nieve en niveles medios de elevación en los Andes (1.665 m). Se puede observar que la acumulación de nieve disminuyó aproximadamente un 50%, de 600 cm en 1950 a 450 cm en 2050.

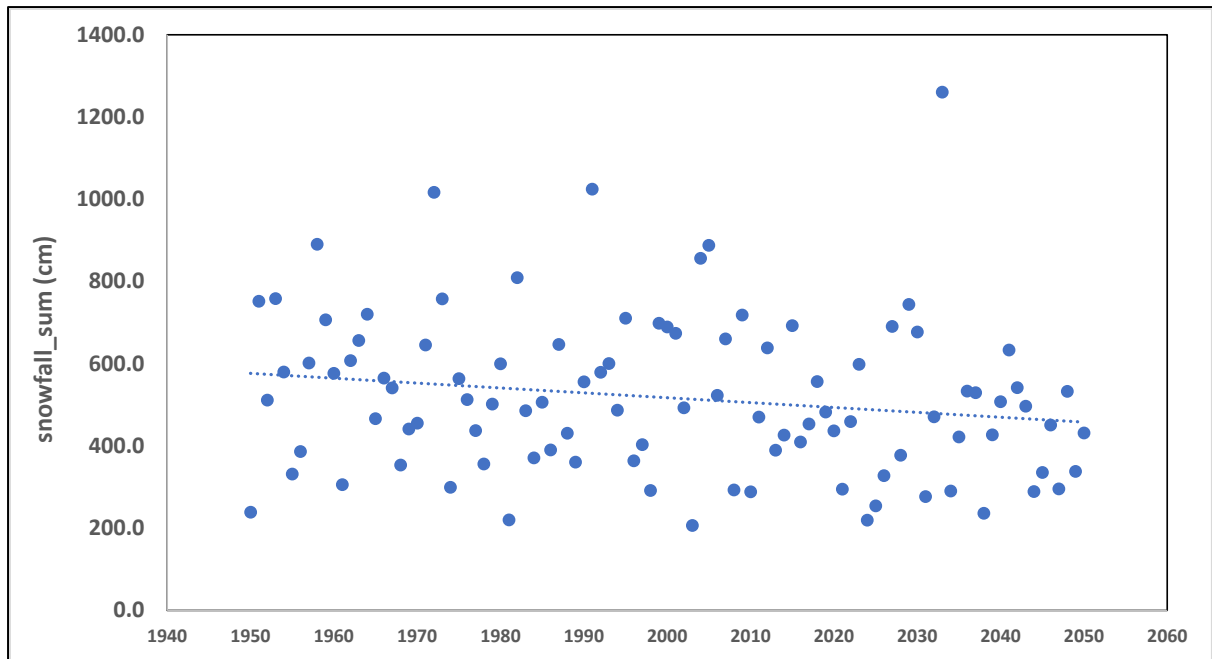


Figura 5-12: Acumulación anual de nieve en la zona de los Andes de Mendoza: 5126m

Tendencias en los parámetros hidrológicos

El promedio anual de agua disponible en la provincia de Mendoza es de 4.888 Hm³ para el período 2000-2021. Sin embargo, el agua disponible está disminuyendo drásticamente con el paso de los años. Se aprecia claramente esta tendencia si se comparan los años correspondientes al inicio del periodo con los del final de este.

La Figura 5-13 muestra la tendencia futura esperada para los volúmenes medios anuales de caudal para el período 2030-2050 con respecto a la línea base 1970-2000. Se puede observar que se espera una nueva disminución en el agua disponible de alrededor del 25% en la provincia en las próximas décadas, como se puede ver en las figuras 5-14 y 5-15 que muestran los cambios mensuales y anuales (%) en el Volúmenes de agua del Río Mendoza para los períodos 2030, 2050 y 2070 respecto al período base 1970-2000.

Las Tablas 5-3 y 5-4 resumen los resultados de los análisis climáticos e hidrológicos y muestran los cambios esperados en los parámetros Hidro-climáticas (tabla 5-3) y agua disponible (tabla 5-4) en la provincia de Mendoza para los diferentes períodos con respecto a 2000-2020.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

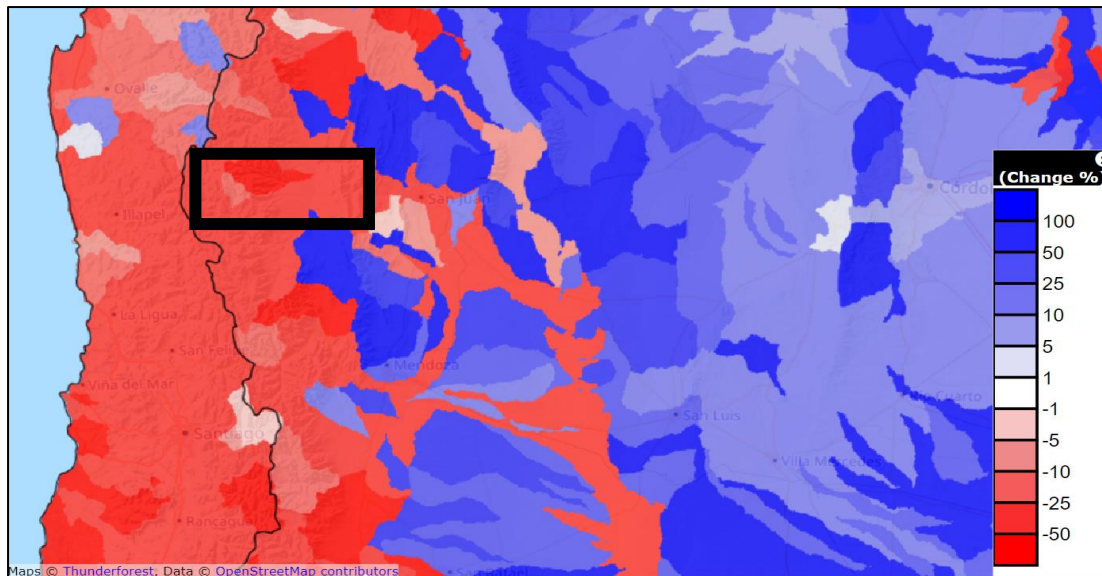


Figura 5-13: Anomalía del volumen medio anual de caudales para el período 2030-2050 con respecto a la línea base 1970-2000

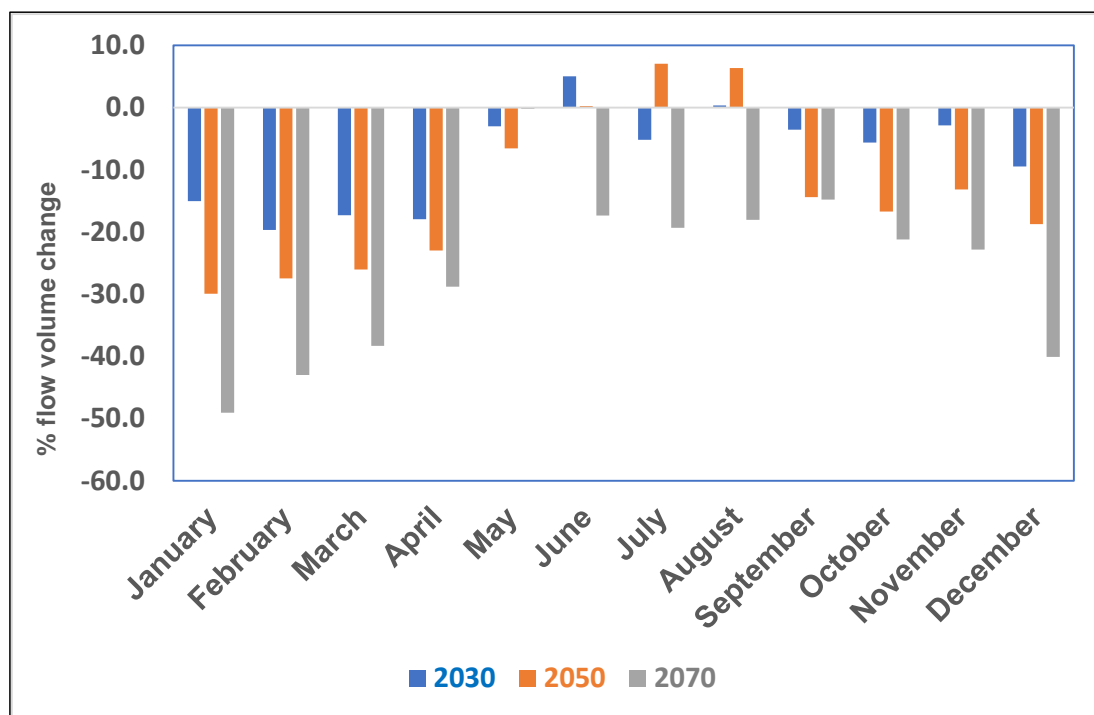


Figura 5-14: Cambios mensuales (%) en los volúmenes de agua del río Mendoza para los períodos 2030, 2050 y 2070 con respecto al período base de 1970-2000

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

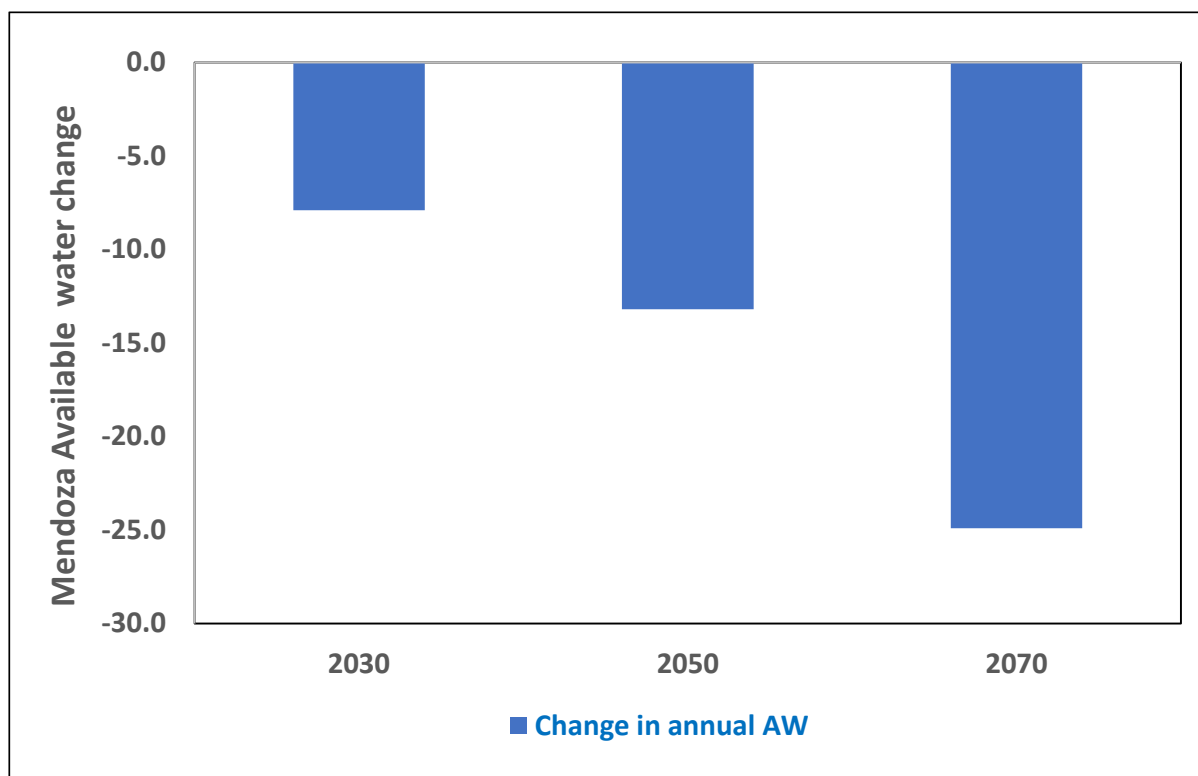


Figura 5-15: Cambios (%) en los volúmenes de agua disponibles en Mendoza para los periodos 2030, 2050 y 2070 respecto al período base 2000-2020

Tabla 5-3: Cambios esperados en los parámetros hidro-climáticos en la provincia de Mendoza para los diferentes periodos respecto al 2000-2020

Periodo	Max. temperaturas (deg.)	Precipitación Anual (%)	Evaporación (%)	Volúmenes de agua disponible (%)
2030	0,7	-6%	3%	-7,90%
2050	1,5	-9%	5%	-13,20%
2070	1,9	-13%	8%	-24,90%

Tabla 5-4: Cambios esperados en el agua disponible en la provincia de Mendoza para los diferentes periodos respecto al 2000-2020

Periodo	AD anual promedio en Mendoza (Hm ³)	Cambio (%) con respecto a 2000-2020
2000-2020	4.888	
2030	4.502	-7,90%
2050	4.243	-13,20%
2070	3.671	-24,90%

5.5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este estudio muestran una clara tendencia de calentamiento en la Cordillera de los Andes en general y en Mendoza en particular. El aumento de las temperaturas y los cambios en las cantidades y patrones de precipitación conducirán a una mayor evaporación, aridez,

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

derretimiento temprano de la nieve y menores valores de humedad del suelo en el país. Nuestros hallazgos con respecto a los hallazgos de temperatura y precipitación están de acuerdo con otros estudios realizados en la región por Rivera et. al (2020), Arnould (2020), Dussailant et al., (2019) y Maenza et al., (2017).

Además, el índice de sequía futura (SPEI) muestra una clara tendencia de sequías más frecuentes e intensas. Se espera que esas tendencias proyectadas conduzcan a un aumento de alrededor del 5% en la demanda de agua para riego agrícola en Mendoza. Los resultados del modelo hidrológico aquí presentados muestran que se espera que disminuyan los volúmenes de agua que fluyen desde los Andes hacia las zonas bajas de las provincias. Esta tendencia prevista supondrá una reducción del -8% en 2030, del -13% en 2050 y del -25% hasta 2070 en el total de agua superficial disponible en la provincia.

El conjunto de múltiples modelos climáticos también muestra una tendencia positiva en las precipitaciones en la zona de llanuras, debido principalmente al aumento de las tormentas convectivas en las estaciones relativamente cálidas. Sin embargo, un aumento de algunos porcentajes en las estaciones de transición y las precipitaciones de verano (precipitaciones monzónicas de verano) en la zona semiárida de la provincia será despreciable y apenas afectará los balances de recursos hídricos de la provincia. En todo caso, provocará inundaciones repentinas y dañinas debido a la mayor intensidad de las precipitaciones.

La provincia de Mendoza se verá afectada por efectos del cambio climático similares a los de otras regiones que se encuentran en el lado negativo de la circulación de células de Hadley alrededor de las latitudes 30 en el norte y sur de Hampshire (Rivera et. al, 2020).

La disminución de la oferta hídrica generará una disminución del agua disponible para la provincia del 13.2% para 2050 y del 25% para 2070. El aumento de la evapotranspiración debido al incremento de las temperaturas que generará un aumento de la demanda de agua por la agricultura comparada con las condiciones actuales. Estas condiciones crean un contexto en el cuales las nuevas demandas de agua no podrán ser abastecidas.

Incluso en un escenario con las mismas demandas totales de agua, será necesario mejorar las estrategias de mitigación para hacer frente a las condiciones de sequía actuales y futuras. De lo contrario, el sector agrícola de la provincia necesitará volúmenes adicionales de agua en las próximas décadas debido a un aumento de la evaporación y una disminución del agua superficial disponible.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Observaciones sobre el informe “Proyecciones del clima y de la oferta hídrica para las próximas décadas en la provincia de Mendoza (IANIGLA – CONICET, 2023)”

La principal diferencia entre los resultados hidrológicos de IANIGLA y Mekorot para el clima futuro (2050) se debe a la diferencia en el período base de comparación utilizado para evaluar el cambio esperado en el agua disponible en el futuro.

Mientras que IANIGLA utilizó solo 9 años como período base (2001-2010), el equipo de Mekorot utilizó una serie temporal más larga de 20 años (2000-2020).

El clima varía naturalmente en muchas escalas de tiempo diferentes: de una estación a otra, de un año a otro y de una década a otra. Muchas de estas variaciones son causadas por las interacciones y la retroalimentación entre los diferentes componentes del sistema climático (atmósfera, océanos, tierra y hielo), muchas de las cuales son caóticas o impredecibles.

Cuando comparamos los resultados del modelo de Mekorot para 2050 con el período base de IANIGLA, obtenemos resultados similares de reducción del derrame de los ríos (escenario SSP5-8.5).

Tabla 5-5: Cambio en el caudal para 2050 con respecto al período base 2001-2010

Río	IANIGLA	Mekorot
Mendoza	-40%	-26%
Tunuyán	-20%	-33%
Diamante	-45%	-32%
Atuel	-30%	-37%
Malargüe	-35%	-28%
Río grande	-30%	

Según los resultados de los modelos implementados por Mekorot la reducción esperada, para cada una de las cuencas de la Provincia de Mendoza, en 2050 con respecto al promedio de la serie 2000-2020 es la siguientes:

- Río Mendoza: 11 % de reducción
- Río Tunuyán: 13% de reducción
- Río Diamante: 16% de reducción
- Río Atuel: 12% de reducción
- Río Malargüe: 11% de reducción

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Sin embargo, en función de la similitud de los resultados obtenidos para las distintas cuencas y a las incertidumbres propias de cualquier proceso de pronóstico se considera metodológicamente adecuado adoptar el valor promedio de 13,2% de reducción del agua disponible en la provincia en 2050 respecto al promedio 2000-2020 para la planificación del sector hídrico.

Comparación entre los volúmenes proyectados

Tabla 5-6: Proyección IANIGLA 2050

	IANIGLA 2001-2010		
	AW 2001-2010 (hm ³)	% afectación	AW 2050 (hm ³)
Río Mendoza	1.555	-40%	933
Río Tunuyán	1.523	-20%	1.219
Río Diamante	1.261	-45%	694
Río Atuel	1.132	-30%	792
Río Malargüe	368	-35%	239
Mendoza Total	5.839		3.876

Tabla 5-7: Proyección Mekorot 2050

	Mekorot 2000-2020		
	AW 2000-2020 (hm ³)	% afectación	AW 2050 (hm ³)
Río Mendoza	1.326	-11%	1.180
Río Tunuyán	1.346	-13%	1.171
Río Diamante	1.029	-16%	865
Río Atuel	902	-12%	794
Río Malargüe	284	-11%	253
Mendoza Total	4.888		4.263

El volumen de agua disponible proyectada para el año 2050 según las estimaciones presentados por IANIGLA es de 3.876 hm³, mientras que el volumen proyectado por Mekorot es de 4.263 hm³.

La diferencia entre los volúmenes proyectados es de 384 hm³ que representa un 9%. Esta diferencia es lo suficientemente pequeña como para asumir que ambos pronósticos son similares y el orden de magnitud del pronóstico es el mismo, siendo adecuado la adopción de cualquiera de ellos.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

6. AGUA DISPONIBLE PROYECTADA PARA 2030,2040 Y 2050

6.1. AGUA SUPERFICIAL

La proyección de agua superficial disponible se realizó como parte del estudio de cambio climático, se utiliza el modelo empírico desarrollado en este estudio y variables meteorológicas como predictores de caudal:

- Profundidad de la capa de nieve en las zonas altas de las cuencas de los ríos (4.000 metros, año actual y anterior).
- Temperaturas (media anual y máxima)
- Precipitación

La siguiente tabla muestra el agua disponible anual prevista en cada río de la provincia de Mendoza:

Tabla 6-1: Agua superficial disponible prevista hasta 2050

Ciclo	Río Mendoza (HM ³)	Río Atuel (HM ³)	Río Diamante (HM ³)	Río Malargüe (HM ³)	Río Tunuyán (HM ³)
2000	1545	1018	1165	331	1588
2001	1412	930	1064	302	1451
2002	1953	1286	1471	418	2007
2003	1515	998	1142	324	1557
2004	1202	792	906	257	1235
2005	1629	1073	1228	349	1674
2006	1456	959	1097	312	1496
2007	1587	1045	1196	340	1631
2008	1236	814	932	265	1271
2009	1063	700	801	228	1092
2010	1118	736	843	239	1149
2011	932	614	702	200	958
2012	1029	678	776	220	1058
2013	1114	734	840	239	1145
2014	906	597	683	194	931
2015	1581	1041	1192	339	1625
2016	1778	1171	1340	381	1827
2017	1013	667	764	217	1042
2018	947	624	714	203	973
2019	971	639	731	208	998
2020	709	467	534	152	728
2021	779	513	587	167	800
2022	1264	833	953	271	1300
2023	1194	786	900	256	1227
2024	1439	948	1085	308	1479

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

2025	881	580	664	189	905
2026	1092	719	823	234	1122
2027	1111	732	837	238	1142
2028	1238	815	933	265	1273
2029	921	606	694	197	946
2030	1509	994	1137	323	1551
2031	1101	725	830	236	1132
2032	708	466	533	152	727
2033	771	508	581	165	793
2034	2305	1518	1737	494	2369
2035	940	619	708	201	966
2036	1036	682	780	222	1064
2037	854	562	643	183	877
2038	1236	814	931	265	1270
2039	978	644	737	209	1005
2040	923	608	696	198	949
2041	1386	913	1044	297	1424
2042	1373	904	1034	294	1411
2043	1227	808	925	263	1261
2044	928	611	699	199	953
2045	781	514	589	167	803
2046	1028	677	775	220	1057
2047	965	636	727	207	992
2048	1225	807	923	262	1259
2049	799	526	602	171	821
2050	894	589	674	192	919
2000-2020	1271	837	958	272	1307
Promedio a 2030	1183	779	892	253	1216
Promedio a 2050	1094	720	824	234	1124

Se encontró que los volúmenes de agua disponibles previstos se distribuyen de acuerdo con una distribución lognormal. Utilizando estas distribuciones fueron calculados los percentiles¹⁰ 5, 10 25, 50, 75, 90 y 95 para cada cuenca.

¹⁰ Un percentil es un valor en la distribución que contiene un porcentaje específico del grupo debajo de él. La definición general es que el pth percentil es el valor que contiene el p% de los valores por debajo de él.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

La siguiente tabla presenta los percentiles calculados:

Tabla 6-2: Agua disponible Mendoza, percentiles anuales - Agua disponible (Hm³)

Total	Año	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
	2030	1.994	2.452	3.093	4.070	5.047	5.688	6.146
2040	1.866	2.327	2.971	3.955	4.939	5.583	6.044	
2050	1.744	2.209	2.859	3.850	4.841	5.491	5.956	
Mendoza	Año	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
	2030	545	670	845	1.112	1.379	1.554	1.679
2040	510	636	812	1.080	1.349	1.525	1.651	
2050	477	604	781	1.052	1.322	1.500	1.627	
Atuel	Año	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
	2030	364	447	564	742	921	1.038	1.121
2040	340	425	542	721	901	1.018	1.103	
2050	318	403	521	702	883	1.002	1.086	
Diamante	Año	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
	2030	415	511	644	848	1.051	1.185	1.280
2040	389	485	619	824	1.029	1.163	1.259	
2050	363	460	595	802	1.008	1.144	1.241	
Malargüe	Año	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
	2030	119	147	185	243	302	340	367
2040	111	139	178	236	295	334	361	
2050	104	132	171	230	289	328	356	
Tunuyán	Año	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
	2030	551	678	855	1.125	1.395	1.572	1.699
2040	516	643	821	1.093	1.365	1.543	1.670	
2050	482	611	790	1.064	1.338	1.517	1.646	

Los percentiles representan la probabilidad de que ocurra el evento, por ejemplo:

En la década 2020-2030, la probabilidad de que el Volumen de Agua Disponible anual sea de 2.000 Hm³ o menos es de una vez cada 20 años, de igual forma para los demás percentiles.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 6-3: Probabilidad de Ocurrencia

Percentiles	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
Probabilidad de Ocurrencia	Cada 20 años	Cada 10 años	Cada 4 años	Cada 2 años	Cada 4 años	Cada 10 años	Cada 20 años

Se pueden analizar diferentes escenarios según la tabla 6-2, por ejemplo:

En la próxima década (2020 - 2030) la probabilidad de que el volumen de agua disponible sea de 6,000 Hm³ o más, es de una vez cada 20 años, en ese caso la provincia deberá estar preparada en cuanto a la disponibilidad de almacenamiento de agua.

El otro evento opcional que puede ocurrir una vez en 20 años es que el volumen de agua disponible será de 2,000 Hm³ o menor, que es menos que el año más seco en los últimos 20 años. En ese caso la provincia debería tener un plan de acción para reducir el suministro de agua a todos los sectores.

6.2. AGUA SUBTERRÁNEA

Aplicación de los modelos de cuenca en WEAP desarrollados por el DGI

La aplicación del software WEAP (*Water Evaluation and Planning System*) en una cuenca hidrográfica permite sintetizar información referida a los procesos hidrológicos que suceden en la misma, como ser: precipitación, escurrimientos, infiltración, evapotranspiración, usos del recurso hídrico, flujos desde y hacia cuencas vecinas tanto superficiales como subterráneas, entre otros. Este enfoque permite estimar y cuantificar los valores que adoptarían las variables para los diversos años y escenarios de usos. A continuación, se explica cómo se utiliza el modelo WEAP en este contexto y como se interpretan los resultados.

Como primer paso, se definen los límites de la cuenca hidrográfica superficial y las zonas homogéneas del acuífero. Este modelo de cuenca abarca ríos, arroyos nivales y de manantiales, canales, zonas de riego, subcuencas que generan infiltración y escorrentía, usos no agrícolas, zonas de reúso de agua, acuíferos y las interconexiones entre todos los elementos.

Se recopilan datos climáticos y de uso del recurso hídrico. Se consideran las derivaciones de los ríos y arroyos principales hacia las zonas cultivadas, la precipitación y evapotranspiración sobre zonas cultivadas y no cultivadas, usos subterráneos del agua y operación de la infraestructura hídrica más relevante. Se identifican y se caracterizan los diferentes usos del agua en la cuenca, como el abastecimiento de agua potable, la irrigación, usos industriales y de abastecimiento poblacional.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Con todos los datos recopilados, se configura el modelo WEAP para representar la cuenca hidrográfica y sus flujos de agua. El modelo simula cómo el agua fluye a través de la cuenca, incluyendo las recargas y salidas de los acuíferos.

Las fuentes de recarga modeladas de los acuíferos son: infiltración en el lecho del río, infiltración en las zonas de cultivo debidas a la ineficiencia de riego, infiltración en las subcuencas sin riego descontando los procesos de escurrimiento y evapotranspiración de la cobertura vegetal y el flujo profundo considerado como recarga natural de zonas homogéneas (acuíferos vecinos) hacia los sectores estudiados.

En resumen, la aplicación de los modelos de cuenca en WEAP permite estimar los valores de bombeo, salida de agua del acuífero, recarga natural y variación en el almacenamiento a través de un balance hídrico que considera volúmenes de aporte y extracciones de agua. En estos modelos se busca establecer una correlación entre las tendencias de variación de niveles estáticos medidos y los representados por el modelo.

Estos modelos son los desarrollados por el DGI para la determinación de los Balances Hídricos de las cuencas provinciales. En el presente documento se respeta el modelo conceptual adoptado para cada cuenca en cuanto a la relación entre el agua superficial y el agua subterránea, específicamente hablando de los procesos de recarga, tránsito y descarga de los acuíferos.

Los mismos sirven como un marco de referencia que debe ser validado con otras metodologías de cálculo.

Se desarrolla a continuación el balance hídrico proyectado para los principales acuíferos

6.2.1. PROSPECTIVA HÍDRICA TUNUYÁN SUPERIOR

Balance hídrico del agua subterránea

Con el propósito de comprender la dinámica del balance hídrico en la cuenca, se realizó un análisis global de los flujos de agua tanto de ingresos como de egresos del acuífero. Los datos correspondientes al período comprendido entre 2001 y 2020 se extraen del Balance Hídrico del Río Tunuyán, y se actualiza con los valores correspondientes a los años 2021 y 2022.

Los procesos hidrológicos, climáticos y de uso del recurso que suceden en la cuenca, quedan representados a través de la oferta hídrica total de la cuenca, los escurrimientos del Río Tunuyán, los ingresos al acuífero, las variaciones en el almacenamiento del mismo, los volúmenes de extracción del acuífero y los aportes de los arroyos de manantial a los escurrimientos del Río Tunuyán. El punto de cierre de la cuenca se define aguas arriba del embalse El Carrizal.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

La representación del sistema a través de un modelo simplificado permite trazar un panorama global de la variabilidad hidrológica de la cuenca y la interacción entre ellas.

Definición de las variables

A continuación, se presentan las variables a representar:

Oferta Total Estimada total

Se compone de la suma del escurrimiento del río Tunuyán en la estación Valle de Uco, los derrames de todos los arroyos de origen nival de cordillera frontal y los aportes por precipitación en las zonas cultivadas.

Río Tunuyán en Valle de Uco

Representa los escurrimientos del río aguas arriba del dique Valle de Uco.

Arroyos de cordillera frontal

Representa los escurrimientos anuales de los arroyos de cordillera frontal. Responden a los derrames generados a través de modelos de precipitación escorrentía, calibrados en las estaciones donde se presentan datos.

Precipitación sobre al área cultivada

Representa el volumen total de agua que precipita sobre la zona cultivada y contribuye a la satisfacción de la demanda. Se estima a partir de los valores de precipitación medidos en estaciones meteorológicas

Derivado en Valle de Uco

Representa los volúmenes de agua distribuido desde el Dique Valle de Uco.

Arroyos de manantial

Representa los volúmenes de agua que aportan los arroyos de manantial al río Tunuyán. Su valor se estima a partir del balance de volúmenes que ingresan al acuífero, son extraídos del mismo y la variación en el almacenamiento.

Ingresos de agua al acuífero

Representa la totalidad de agua que ingresa al sistema de acuíferos de la cuenca.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Producción del acuífero

Representa el agua que es extraída del acuífero para satisfacer demandas hídricas, ya sean agrícolas, poblacionales o industriales.

Variación en el almacenamiento del acuífero

Representa la diferencia entre el agua que ingreso y egresa para cada periodo hídrico.

Balance hídrico actual 2001 a 2020

Mediante datos extraídos del Balance Hídrico del Río Tunuyán, se confecciona un Balance Hídrico global del acuífero.

Tabla 6-4: Balance Hídrico actual. Valores expresados en Hm³/año

Año	Oferta total WEAP	Derrame Río Tunuyán en Valle de Uco	Arroyos Cordillera Frontal	Precip. sobre área cultivada	Derivado Canal Matriz Valle de Uco.	Río Tunuyán + Manantiales	Ingreso al acuífero	Volumen extraído del acuífero.	Variación en el almacenamiento.	Aportes de arroyos de manantial al Río Tunuyán
2001	1694	1148	312	234	212	1545	802	319	87	397
2002	1841	1151	463	227	202	1647	1033	297	239	496
2003	1807	1105	509	193	258	1623	1158	362	278	518
2004	1255	687	342	227	219	1087	935	448	87	400
2005	1611	1017	339	255	188	1405	887	322	177	388
2006	2166	1435	572	159	249	2015	1317	437	300	580
2007	1703	1003	452	248	226	1492	1075	350	236	489
2008	1638	1063	356	219	206	1485	917	342	154	421
2009	1424	858	424	142	234	1298	1019	445	134	440
2010	1284	814	309	160	225	1159	846	527	-26	345
2011	889	515	247	127	166	792	746	559	-89	277
2012	974	572	262	140	151	855	732	519	-70	283
2013	1082	643	290	149	160	937	748	485	-31	294
2014	1032	533	288	211	159	840	795	511	-23	307
2015	1050	566	280	204	157	857	768	502	-26	291
2016	1476	773	390	313	133	1239	1009	353	190	466
2017	1107	635	320	152	188	972	905	591	-23	337
2018	969	467	231	271	167	773	743	462	-25	306
2019	1094	473	372	249	145	847	907	434	99	374
2020	1013	504	301	208	122	809	826	453	68	305

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

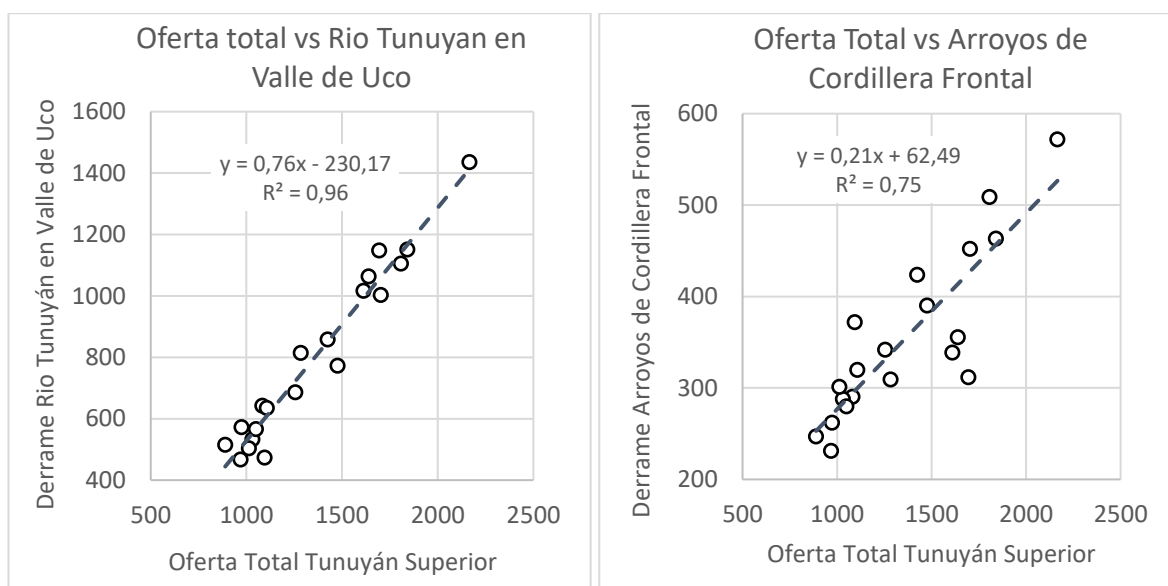
Balance hídrico proyectado a 2050.

El objetivo del análisis prospectivo es evaluar el impacto que genera, sobre el balance hídrico del acuífero, una sostenida disminución de la oferta hídrica, situación esperada bajo la actual tendencia de cambio climático. Para ello, se aplica al citado modelo, las ofertas estimadas hacia mediados del siglo XXI.

En este estudio se propone abordar la intersección entre la oferta esperada hacia mediados del siglo XXI y el sistema hidrológico del Tunuyán Superior, que permita proyectar las condiciones de las variables estudiadas hacia el año 2050.

Desde el aspecto metodológico se realiza una correlación lineal entre los valores estimados mediante el modelo WEAP y la oferta total del sistema.

A continuación, se presentan los resultados de estas correlaciones, que permitirán realizar el análisis prospectivo.



Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

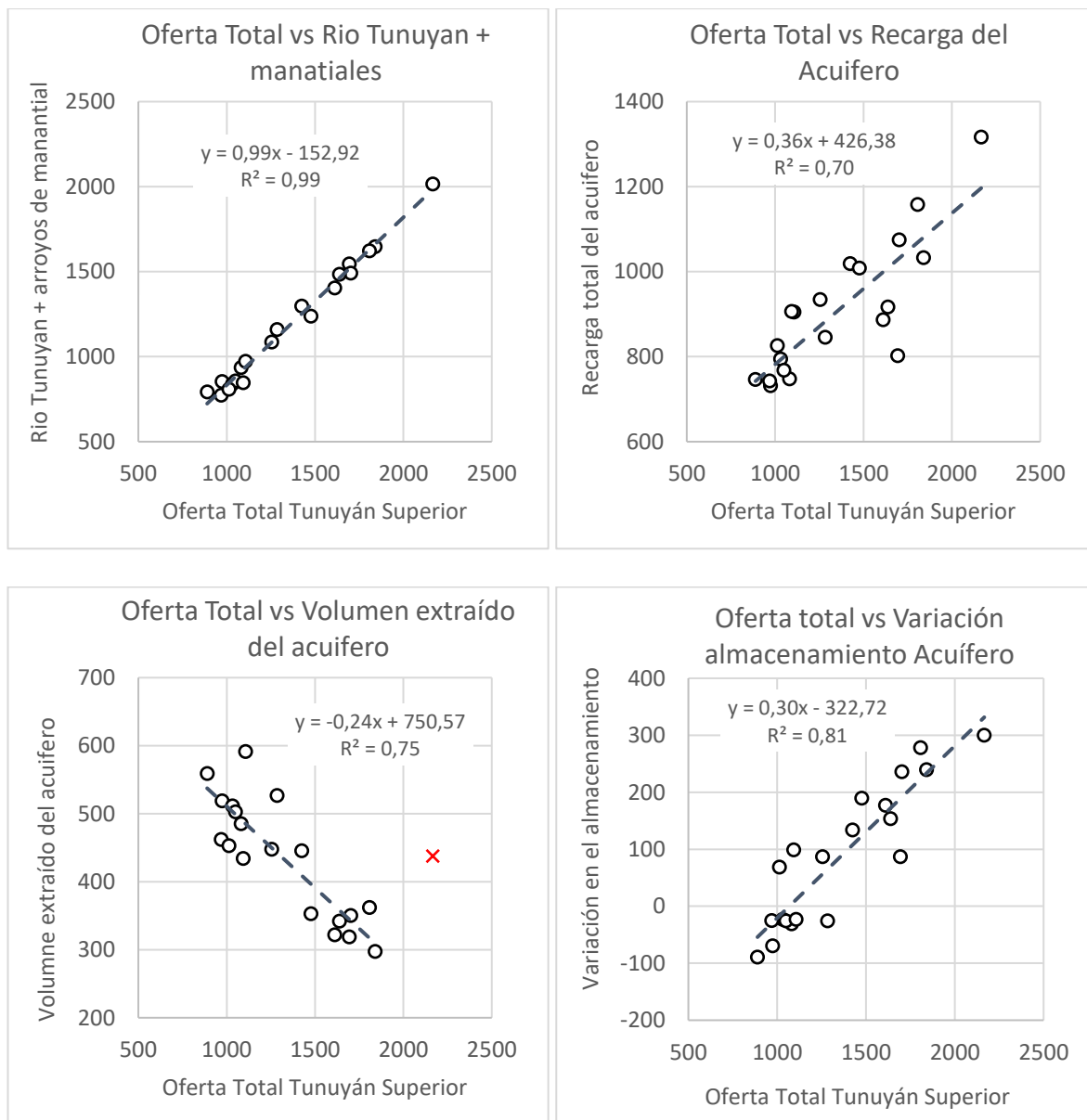


Figura 6-1: Correlaciones entre las distintas variables

En análisis considera aspectos influyentes para la demanda como ser la superficie cultivada, el alcance que tiene el uso de agua subterránea y los cultivos como variables constantes. Esto se debe, por un lado, a la inexistencia de proyecciones de esas variables y por otro lado al objetivo del estudio, que es el de evaluar las tendencias y relaciones entre la oferta total (estimada y proyectada) con las variables que componen el balance hídrico del agua subterránea. También es importante aclarar que el volumen de agua subterránea extraído responde a dos situaciones distintas, por un lado, la demanda de extensas zonas de uso exclusivo de agua subterránea, siendo la demanda de bombeo de estas independiente de la oferta hídrica del río y otras zonas donde el agua subterránea es utilizada como refuerzo de dotación, altamente dependiente de los derrames del río.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Para la construcción del Balance Hídrico proyectado al año 2050 se aplican las correlaciones anteriores, calculando el volumen de arroyos de manantial que aportan al río por el balance de volúmenes en el acuífero. Los caudales derivados en el Dique Valle de Uco se estiman con la actual regla de operación, siendo esta el 18% de la sumatoria entre el derrame del Río Tunuyán en la estación Valle de Uco y los aportes de los arroyos de manantial.

Ambos modelos presentan datos para el periodo 2001 a 2022, extensión de tiempo más que suficiente para evaluar las bondades de ambos modelos.

Se presentan los valores de oferta hídrica total del sistema para el periodo 2001 a 2022 tanto los valores estimados para el Balance Hídrico como los valores que arroja el estudio prospectivo de la oferta:

Tabla 6-5: oferta hídrica total del sistema para el periodo 2001 a 2022 (hm³/año)

Año	Oferta Total. Escenario Proyectado	Oferta total WEAP
2001	1451	1694
2002	2007	1841
2003	1557	1807
2004	1235	1255
2005	1674	1611
2006	1496	2166
2007	1631	1703
2008	1271	1638
2009	1092	1424
2010	1149	1284
2011	958	889
2012	1058	974
2013	1145	1082
2014	931	1032
2015	1625	1050
2016	1827	1476
2017	1042	1107
2018	973	969
2019	998	1094
2020	728	1013

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

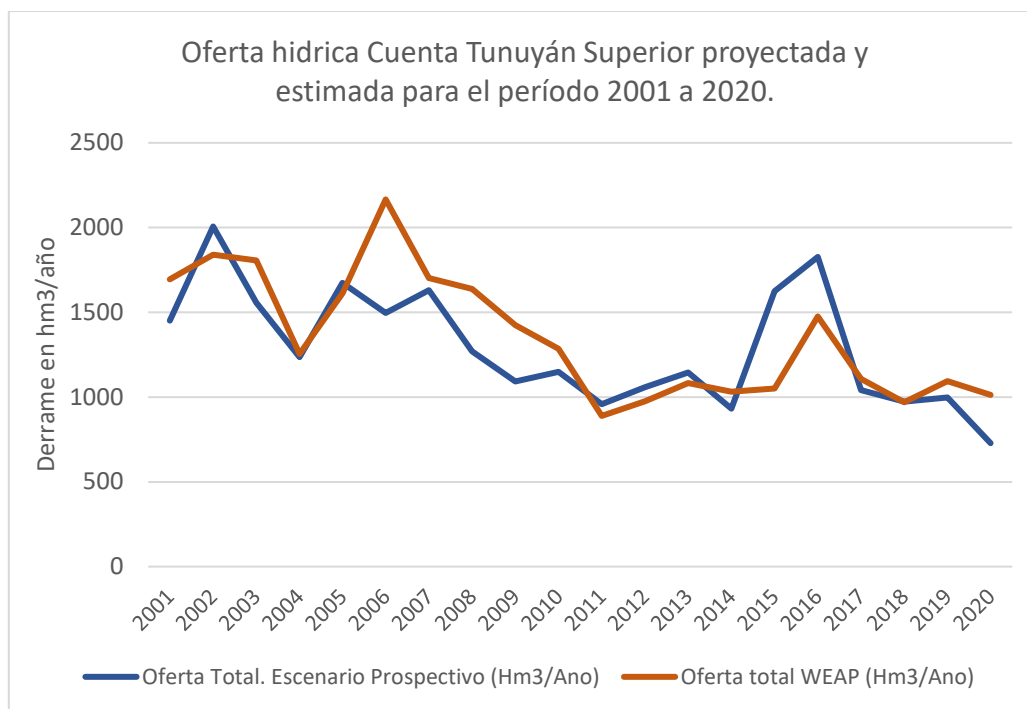


Figura 6-2: Oferta Hídrica. Cuenca Río Tunuyán

Al analizar las tendencias en los valores de oferta hídrica, aplicando una media móvil de 10 años, se observa que las dos series representan la persistente disminución de la oferta hídrica sucedida en los últimos años.

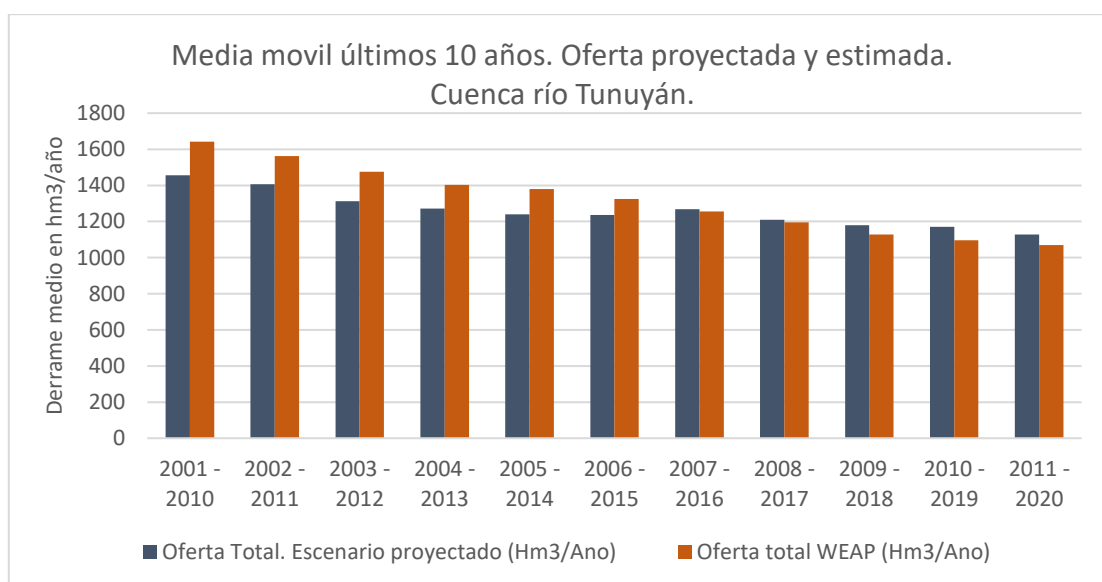


Figura 6-3: Tendencia Oferta Hídrica. Cuenca río Tunuyán Superior. Media móvil de 10 años.

El mismo análisis puede realizarse para todos los valores de oferta hídrica total, dando por resultado el escenario de oferta hídrica base que se aplica al modelo hacia el año 2050.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 6-6: Oferta hídrica de acuerdo con el modelo calibrado hasta el año 2050 (hm³/año)

Año	Oferta Total. Escenario Prospectivo	Derrame Río Tunuyán en Valle de Uco	Arroyos Cordillera Frontal	Precip. sobre área cultivada	Derivado Canal Matriz Valle de Uco.	Río Tunuyán + Manantiales	Ingreso al acuífero	Volumen extraído del acuífero.	Variación en el almacenamiento.	Aportes de arroyos de manantial al Río Tunuyán
2021	800	377	234	189	115	636	711	559	-81	233
2022	1209	687	322	200	187	1040	856	461	43	353
2023	1538	937	392	209	246	1364	973	382	142	449
2024	1508	914	386	209	240	1334	962	389	133	440
2025	922	469	260	193	136	756	754	530	-44	269
2026	837	405	242	190	121	672	724	550	-70	244
2027	1010	536	279	195	152	843	785	509	-18	294
2028	1297	754	340	203	203	1126	887	440	69	379
2029	888	443	253	192	130	722	742	538	-55	259
2030	1551	946	395	210	248	1376	978	379	146	453
2031	1132	628	305	198	173	963	829	479	19	330
2032	727	322	218	187	102	564	685	576	-103	212
2033	793	371	232	189	113	629	708	561	-83	231
2034	2087	1353	510	224	343	1905	1168	250	308	610
2035	966	502	269	194	144	799	770	519	-31	282
2036	1064	577	291	197	161	897	805	495	-1	310
2037	877	435	251	191	128	712	738	540	-58	256
2038	1236	708	327	201	192	1066	866	454	51	361
2039	953	493	267	194	142	787	765	522	-35	278
2040	830	400	240	190	120	666	722	552	-72	242
2041	841	408	243	190	122	676	725	549	-69	245
2042	1219	694	324	201	189	1049	860	458	46	356
2043	1004	532	278	195	151	838	783	510	-19	293
2044	728	322	218	187	102	565	685	576	-103	212
2045	809	384	236	190	116	645	714	557	-78	236
2046	909	460	257	192	134	744	750	533	-48	265
2047	885	441	252	192	130	720	741	538	-55	258
2048	825	395	239	190	119	660	720	553	-74	240
2049	884	440	252	192	129	719	741	539	-56	258
2050	857	420	246	191	125	692	731	545	-64	250

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta



Figura 6-4: Tendencia en los valores de oferta hídrica total, escenario proyectado

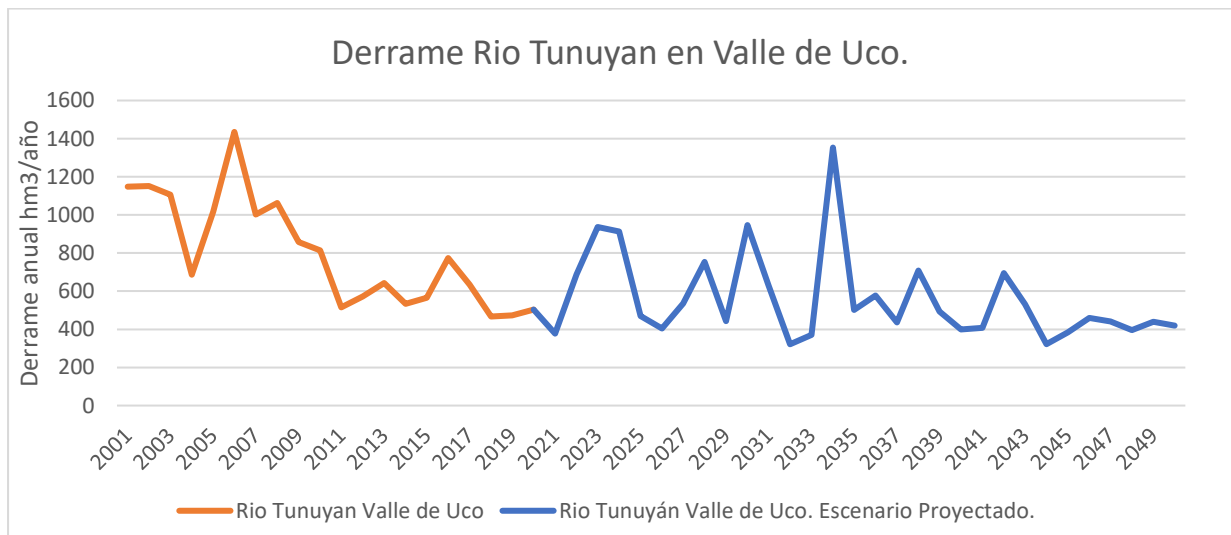


Figura 6-5: Derrames anuales Río Tunuyán en Valle de Uco hacia el año 2050

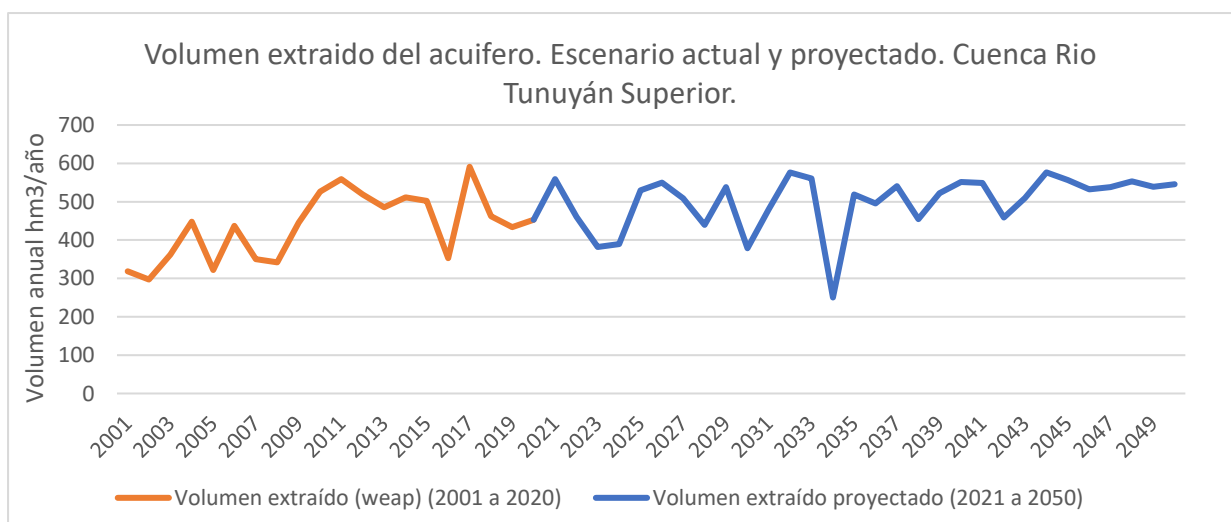


Figura 6-6: Volumen extraído del acuífero, proyectado al año 2050

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

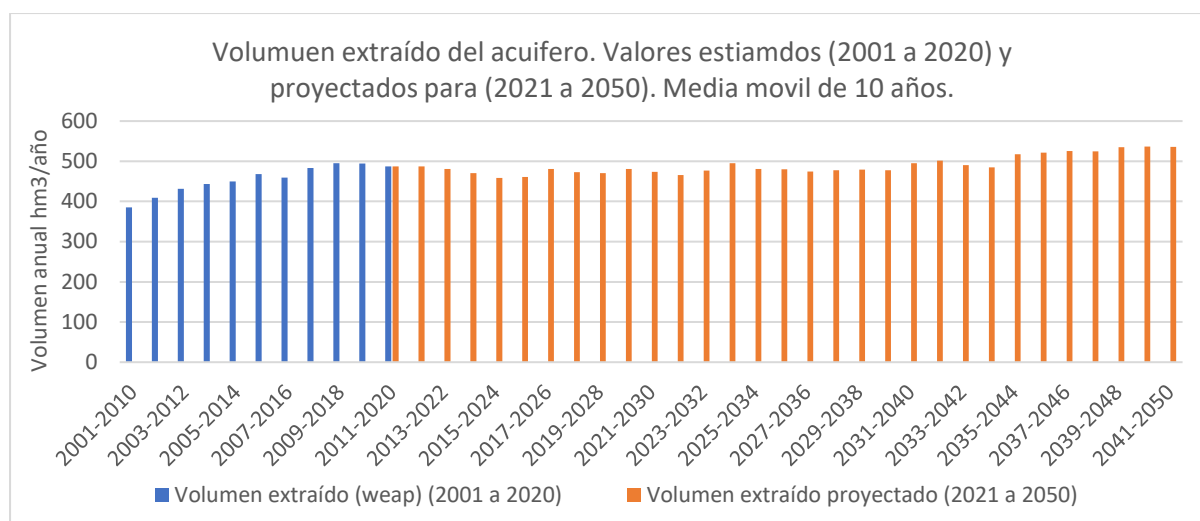


Figura 6-7: Media móvil de 10 años. Volumen Extraído del acuífero, escenario proyectado a 2050

6.2.2. PROSPECTIVA HÍDRICA AGUA SUBTERRÁNEA RÍO TUNUYÁN INFERIOR

Introducción metodológica del modelo

Con el objetivo de comprender la dinámica del balance hídrico en la cuenca, se llevó a cabo un análisis integral de los flujos de agua, tanto de ingreso como de egreso del acuífero. Los datos correspondientes al período entre 2001 y 2020 se obtienen del Balance Hídrico del Río Tunuyán Inferior

La fuente principal de recarga se identifica tanto en la infiltración producida en el lecho del río Tunuyán como en la del río Mendoza. El modelo considera la precipitación que cae sobre toda la cuenca, el agua derivada de riego, las extracciones de agua subterránea y las salidas del acuífero a acuíferos vecinos.

De este modelo se extraen los datos necesarios para representar el comportamiento global del balance hídrico del agua subterránea, caracterizándolo a través de las variables: ingreso de agua al acuífero, extracciones de agua subterránea, salidas del acuífero y variación en el almacenamiento.

El modelo contempla al acuífero como un sistema de diversas zonas homogéneas que interactúan entre sí. A los fines de establecer tendencias en el comportamiento de las variables, se agregan todos los procesos que ocurren en cada zona homogénea, con el objetivo de observar el comportamiento global del sistema, tanto en el Balance Hídrico del periodo mencionado con anterioridad, como en el escenario prospectivo de disminución continuada de la oferta hídrica hacia mediados de siglo XXI.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Definición de las variables

A continuación, se presentan las variables a representar:

Oferta Total Estimada Río Tunuyán

Representa las erogaciones anuales del Río Tunuyán desde la presa El Carrizal para el periodo 2001 a 2020.

Oferta Total Estimada Río Mendoza

Representa las erogaciones anuales del Río Mendoza desde la presa Potrerillos para el periodo 2001 a 2020.

Ingreso de agua al acuífero

Representa la sumatoria de la infiltración del agua de las áreas bajo riego, el agua que precipita sobre la cuenca y que no evapotranspira ni escurre y los aportes del río Tunuyán y Mendoza en sus sectores de recarga y los aportes de los acuíferos vecinos a la zona estudiada.

Extracciones o producción del acuífero

Representa todo el volumen que se extrae del acuífero para riego agrícola, uso poblacional y uso industrial.

Salidas del acuífero

Representa el volumen que fluye más allá de los límites de la zona homogénea estudiada.

Variación en el almacenamiento

Representa la diferencia entre los volúmenes de agua ingresados y los egresos de la cuenca. Un valor negativo, significa una disminución en la cantidad de agua almacenada en la zona estudiada.

Balance hídrico del agua subterránea. Años 2001 a 2020

A continuación, se presenta el escenario base donde se estiman los valores de las variables mencionadas anteriormente. Esto permite establecer relaciones entre ellas y la oferta hídrica total, representada por el promedio entre los derrames del río Mendoza y Tunuyán.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 6-7: Balance Hídrico Global del Acuífero del Río Tunuyán Inferior (hm³/año)

Año	Oferta El Carrizal WEAP	Oferta total estimada WEAP TS	Oferta Río Mendoza	Oferta media WEAP Tunuyán y Mendoza	Salidas del acuífero	Extracciones totales de agua subterránea	Ingresos al acuífero	Variación Almacenamiento	Extracciones Zona exclusiva Agua subterránea	Refuerzo de dotación
2001	1181.5	1694.2	1687.9	1691.1	402.3	213.6	627.4	11.5	186.2	27.4
2002	1402.8	1840.7	1603.0	1721.8	409.4	265.0	677.9	3.5	235.7	29.4
2003	1476.0	1807.1	1869.7	1838.4	462.1	274.4	680.7	-55.8	246.1	28.3
2004	975.6	1255.4	1445.9	1350.6	387.7	273.9	716.6	55.1	229.9	43.9
2005	797.8	1610.8	1117.1	1364.0	335.8	255.5	612.0	20.7	200.8	54.7
2006	1749.7	2166.2	2296.9	2231.5	548.2	253.2	664.9	-136.6	224.3	28.9
2007	1359.4	1702.8	2033.3	1868.0	528.0	261.3	707.9	-81.3	232.2	29.0
2008	1006.4	1638.4	1563.0	1600.7	406.8	240.8	630.2	-17.4	207.4	33.4
2009	1238.8	1424.2	2004.6	1714.4	483.2	261.9	659.0	-86.2	227.5	34.4
2010	1042.5	1284.2	1473.2	1378.7	359.6	239.7	561.5	-37.8	209.8	29.9
2011	623.4	889.2	844.0	866.6	215.0	304.6	464.1	-55.6	215.7	88.9
2012	591.5	974.4	1003.5	988.9	240.8	276.6	467.1	-50.3	223.6	53.0
2013	687.4	1082.3	1042.9	1062.6	254.8	235.5	465.5	-24.8	184.9	50.6
2014	749.4	1031.9	1079.8	1055.8	284.4	304.0	538.4	-49.9	226.4	77.6
2015	633.9	1049.9	988.5	1019.2	253.8	315.0	500.6	-68.1	235.2	79.8
2016	841.4	1476.3	1378.3	1427.3	383.6	250.5	694.2	60.1	212.8	37.7
2017	770.7	1106.6	1541.6	1324.1	378.6	251.2	575.3	-54.5	213.6	37.6
2018	650.8	969.2	1057.6	1013.4	290.4	298.5	522.7	-66.2	234.7	63.7
2019	636.3	1094.0	963.9	1028.9	253.6	281.6	506.0	-29.2	220.3	61.3
2020	624.7	1013.1	863.7	938.4	219.2	254.0	452.1	-21.1	196.1	57.9

Balance hídrico proyectado a 2050.

El propósito del análisis prospectivo consiste en evaluar el efecto que genera un cambio en la disponibilidad de agua sobre el balance hídrico del acuífero.

Para el presente estudio se analizan las tendencias de las variables que caracterizan el comportamiento global del sistema. Como dato de entrada se considera la oferta hídrica proyectada para la cuenca del Río Tunuyán hacia mediados del siglo XXI del estudio: "*Climate change effects, Mendoza*" realizados por: Mekorot 2023, Dr. Amir Givati.

Los valores de Ingreso al acuífero, extracciones y salidas se estiman mediante una correlación lineal entre los mismos y la oferta del sistema representada por el promedio entre los derrames del Río Mendoza en Potrerillos y los del Río Tunuyán en El Carrizal.

Para la evaluación del volumen extraído, se separan las áreas de uso exclusivo de agua subterránea con las áreas que utilizan la misma como refuerzo de dotación, siendo las primeras independientes de la oferta hídrica del sistema y las segundas dependientes del mismo.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 6-8: Balance Hídrico Global proyectado del Acuífero del Río TI (2021-2050), en hm³/año

Año	Oferta Total. Escenario Prospectivo Tunuyán	Oferta Total. Escenario Prospectivo Mendoza	Oferta Promedio escenario Prospectivo (Tunuyán y Mendoza)	Oferta en El Carrizal	Extracciones totales de agua subterránea	Salidas del acuífero	Ingresos al acuífero	Variación de Almacenamiento
2021	800.2	777.2	788.7	476.9	289.9	203.7	468.6	-25.0
2022	1209.4	1262.1	1235.8	827.0	271.3	319.1	558.3	-32.0
2023	1538.3	1191.4	1364.9	1108.5	265.9	352.4	584.3	-34.1
2024	1507.7	1436.6	1472.1	1082.2	261.5	380.1	605.8	-35.8
2025	921.6	879.0	900.3	580.7	285.3	232.5	491.0	-26.8
2026	836.7	1089.6	963.1	508.1	282.6	248.7	503.6	-27.8
2027	1009.7	1109.0	1059.3	656.1	278.6	273.5	522.9	-29.3
2028	1297.0	1236.0	1266.5	902.0	270.0	327.0	564.5	-32.5
2029	887.6	918.9	903.2	551.6	285.1	233.3	491.6	-26.8
2030	1550.6	1506.0	1528.3	1119.0	259.1	394.6	617.1	-36.6
2031	1131.9	1099.4	1115.6	760.7	276.3	288.1	534.2	-30.2
2032	727.3	706.4	716.9	414.5	292.9	185.2	454.1	-23.9
2033	792.6	769.8	781.2	470.4	290.2	201.8	467.1	-24.9
2034	2087.3	2300.5	2193.9	1578.2	231.4	566.4	750.7	-47.1
2035	965.6	937.9	951.8	618.4	283.1	245.8	501.3	-27.6
2036	1064.4	1033.8	1049.1	702.9	279.1	270.9	520.9	-29.1
2037	877.4	852.2	864.8	542.9	286.7	223.3	483.9	-26.2
2038	1236.1	1233.6	1234.8	849.8	271.3	318.8	558.2	-32.0
2039	953.1	976.0	964.5	607.7	282.6	249.1	503.9	-27.8
2040	830.5	921.6	876.0	502.8	286.3	226.2	486.1	-26.4
2041	840.7	1383.2	1112.0	511.5	276.5	287.1	533.5	-30.1
2042	1218.9	1370.2	1294.5	835.1	268.9	334.2	570.1	-33.0
2043	1004.4	1225.0	1114.7	651.6	276.3	287.8	534.0	-30.1
2044	727.8	925.8	826.8	414.9	288.3	213.5	476.2	-25.6
2045	809.5	779.7	794.6	484.8	289.7	205.2	469.7	-25.1
2046	909.3	1026.3	967.8	570.2	282.5	249.9	504.5	-27.8
2047	885.1	963.4	924.2	549.5	284.3	238.7	495.8	-27.2
2048	824.6	1223.0	1023.8	497.7	280.1	264.4	515.8	-28.7
2049	883.9	797.1	840.5	548.5	287.8	217.1	479.0	-25.8
2050	856.8	892.7	874.8	525.3	286.3	225.9	485.9	-26.4

6.2.3. PROSPECTIVA HÍDRICA AGUA SUBTERRÁNEA RÍO MENDOZA

Con el objetivo de comprender la dinámica del balance hídrico en la cuenca, se llevó a cabo un análisis integral de los flujos de agua, tanto de ingreso como de egreso del acuífero. Los datos correspondientes al período entre 2001 y 2020 se obtienen del Balance Hídrico del Río Mendoza.

El modelo contempla todos los procesos hidrológicos que suceden en la cuenca. La fuente principal de abastecimiento de agua es el río Mendoza, medido aguas arriba del embalse Potrerillos. Contempla también la precipitación que cae sobre toda la cuenca, los derrames ocasionales de las subcuencas

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

pedemontanas, el agua derivada de riego, las extracciones de agua subterránea y las salidas del acuífero a acuíferos vecinos.

De este modelo se extraen los datos necesarios para representar el comportamiento global del balance hídrico del agua subterránea, caracterizándolo a través de las variables: ingreso de agua al acuífero, extracciones de agua subterránea, salidas del acuífero y variación en el almacenamiento.

El modelo contempla al acuífero como un sistema de diversas zonas homogéneas que interactúan entre sí. Establecimiento zonas de surgencia y zonas libres. A los fines de establecer tendencias en el comportamiento de las variables, se agregan todos los procesos que ocurren en cada zona homogénea, con el objetivo de observar el comportamiento global del sistema, tanto en el Balance Hídrico del periodo mencionado con anterioridad, como en el escenario prospectivo de disminución continuada de la oferta hídrica hacia mediados de siglo XXI.

Definición de las variables

A continuación, se presentan las variables a representar:

Oferta Total Estimada

Representa los derrames anuales del Río Mendoza registrados en la estación Guido para el periodo 2001 a 2020.

Ingreso de agua al acuífero

Representa la sumatoria de la infiltración del agua de las áreas bajo riego, el agua que precipita sobre la cuenca y que no evapotranspira ni escurre y los aportes del río Mendoza en su tramo entre el embalse Potrerillos y el Dique Cipolletti.

Extracciones o producción del acuífero

Representa todo el volumen que se extrae del acuífero para riego agrícola, uso poblacional y uso industrial.

Salidas del acuífero

Representa el volumen que fluye más allá de los límites de la zona homogénea estudiada. El modelo lo considera como el flujo del acuífero estudiado a acuíferos vecinos.

Variación en el almacenamiento

Representa la diferencia entre los volúmenes de agua ingresados y los egresos de la cuenca. Un valor negativo, significa una disminución en la cantidad de agua almacenada en la zona estudiada.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Balance hídrico del agua subterránea. Años 2001 a 2020

A continuación, se presenta el escenario base donde se estiman los valores de las variables mencionadas anteriormente. Esto permite establecer relaciones entre ellas con la oferta hídrica total, representada por el escurrimiento del Río Mendoza y poder construir el escenario prospectivo.

Tabla 6-9: Balance Hídrico Global del Acuífero del Río Mendoza (hm³/año)

Año	Derrame Río Mendoza	Ingresos al acuífero	Extracciones del acuífero	Salidas de acuífero	Variación en el almacenamiento
2001	1688	933	247	717	-31
2002	1603	958	203	784	-28
2003	1870	997	281	733	-17
2004	1446	1018	346	748	-76
2005	1117	868	370	591	-93
2006	2297	1042	280	725	37
2007	2033	1020	206	789	25
2008	1563	948	246	740	-38
2009	2005	1033	238	783	11
2010	1473	915	305	693	-83
2011	844	804	454	530	-180
2012	1003	787	464	508	-185
2013	1043	827	429	559	-161
2014	1080	924	376	690	-142
2015	989	865	376	636	-147
2016	1378	906	225	735	-55
2017	1542	929	172	745	12
2018	1058	831	338	610	-116
2019	964	853	433	570	-150
2020	864	773	376	535	-138

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

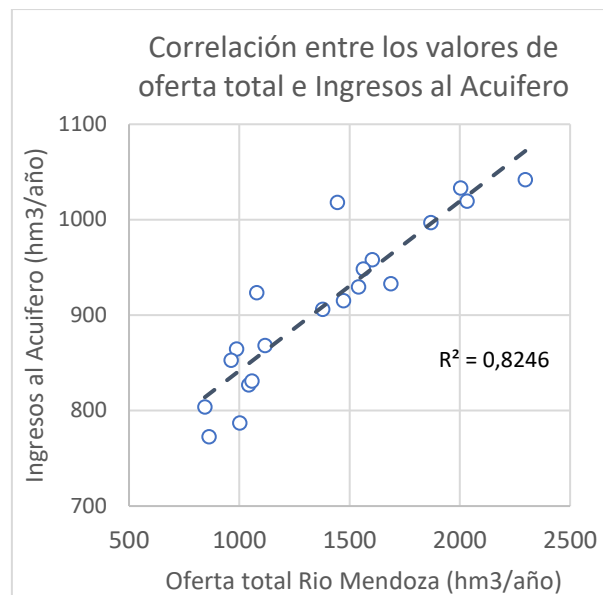


Figura 6-8: Correlación entre los valores de oferta total e Ingresos al acuífero (Mendoza)

Balance hídrico proyectado a 2050.

El propósito del análisis prospectivo consiste en evaluar el efecto que genera un cambio en la disponibilidad de agua sobre el balance hídrico del acuífero.

Para el presente estudio se analizan las tendencias de las variables que caracterizan el comportamiento global del sistema. Como dato de entrada se considera la oferta hídrica proyectada a mediados del siglo XXI del estudio: "*Climate change effects, Mendoza*" realizados por: Mekorot 2023, Dr. Amir Givati.

Los valores de Ingreso al acuífero, extracciones y salidas se estiman mediante una correlación lineal entre los mismos y el derrame del Río Mendoza. La variación en el almacenamiento se estima mediante la diferencia de los mismos.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 6-10: Balance Hídrico Global proyectado del Acuífero del Río Mendoza (2021-2050), en hm³/año

Año	Oferta proyectada	Ingresos al acuífero	*Extracciones del acuífero	Salidas de acuífero	Variación en el almacenamiento
2021	777	802	417	560	-175
2022	1262	888	339	647	-98
2023	1191	876	350	635	-109
2024	1437	919	311	679	-71
2025	879	820	401	578	-159
2026	1090	858	367	616	-125
2027	1109	861	364	620	-122
2028	1236	884	343	643	-102
2029	919	827	394	585	-152
2030	1506	932	300	691	-60
2031	1099	859	365	618	-124
2032	706	790	428	547	-186
2033	770	801	418	558	-176
2034	2300	1073	173	835	65
2035	938	831	391	589	-149
2036	1034	848	376	606	-134
2037	852	816	405	573	-163
2038	1234	883	344	642	-103
2039	976	837	385	596	-143
2040	922	828	394	586	-152
2041	1383	910	320	669	-79
2042	1370	908	322	667	-81
2043	1225	882	345	641	-104
2044	926	829	393	587	-151
2045	780	803	417	560	-174
2046	1026	846	377	605	-135
2047	963	835	387	593	-145
2048	1223	881	345	640	-104
2049	797	806	414	563	-171
2050	893	823	398	581	-156

* Extracciones del acuífero (Hm³/Año) - según registros anteriores.

6.2.4. PROSPECTIVA HÍDRICA AGUA SUBTERRÁNEA RÍO ATUEL

Introducción metodológica del modelo

Con el objetivo de comprender la dinámica del balance hídrico en la cuenca, se llevó a cabo un análisis integral de los flujos de agua, tanto de ingreso como de egreso del acuífero. Los datos correspondientes al período entre 2001 y 2020 se obtienen del Balance Hídrico del Río Atuel

El modelo contempla todos los procesos hidrológicos que suceden en la cuenca. La fuente principal de abastecimiento de agua es el río Atuel, contemplando las erogaciones de la presa Valle Grande. El

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

modelo considera la precipitación que cae sobre toda la cuenca, el agua derivada de riego, las extracciones de agua subterránea, las salidas del acuífero a acuíferos vecinos, la dinámica entre el agua subterránea y la conformación de desagües colectores en la parte sur de la cuenca, así como la interacción entre el agua subsuperficial y el río Atuel antes de Paso de la Arena.

De este modelo se extraen los datos necesarios para representar el comportamiento global del balance hídrico del agua subterránea, caracterizándolo a través de las variables: ingreso de agua al acuífero, extracciones de agua subterránea, desagües o colectores, salidas del acuífero y variación en el almacenamiento.

El modelo contempla al acuífero como un sistema de diversas zonas homogéneas que interactúan entre sí, así como el comportamiento entre el agua subsuperficial y los cauces que la recolectan y conforman el escurrimiento en los colectores. A los fines de establecer tendencias en el comportamiento de las variables, se agregan todos los procesos que ocurren en cada zona homogénea, con el objetivo de observar el comportamiento global del sistema, tanto en el Balance Hídrico del periodo mencionado con anterioridad, como en el escenario prospectivo de disminución continuada de la oferta hídrica hacia mediados de siglo XXI.

Definición de las variables

A continuación, se presentan las variables a representar:

Oferta Total Estimada

Representa los derrames anuales del Río Atuel a la salida de la presa Valle Grande registrados para el periodo 2001 a 2020.

Ingreso de agua al acuífero

Representa la sumatoria de la infiltración del agua de las áreas bajo riego, el agua que precipita sobre la cuenca y que no evapotranspira ni escurre y los aportes del río Atuel que puedan infiltrarse en su lecho y los aportes de los acuíferos vecinos a la zona estudiada.

Extracciones o producción del acuífero

Representa todo el volumen que se extrae del acuífero para riego agrícola, uso poblacional y uso industrial.

Salidas del acuífero

Representa el volumen que fluye más allá de los límites de la zona homogénea estudiada.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Variación en el almacenamiento

Representa la diferencia entre los volúmenes de agua ingresados y los egresos de la cuenca. Un valor negativo, significa una disminución en la cantidad de agua almacenada en la zona estudiada.

Derrames de los colectores

Representa el agua subsuperficial que conforma los derrames de los colectores y que aporta al caudal del Río Atuel agua arriba de la estación Paso de la Arena.

Balance hídrico del agua subterránea. Años 2001 a 2020

A continuación, se presenta el escenario base donde se estiman los valores de las variables mencionadas anteriormente. Esto permite establecer relaciones entre ellas con la oferta hídrica total, representada por el escurrimiento del Río Atuel y poder construir el escenario prospectivo.

Tabla 6-11: Balance Hídrico Global del Acuífero del Río Atuel, en hm³/año

Año	Erogación de Valle Grande	Ingresos al acuífero	Extracciones del acuífero	Derrame de colectores y aporte subsuperficial al Río Atuel	Salidas del acuífero hacia el sur	Variación en el almacenamiento
2001	1158	896	98	265	651	-119
2002	1300	986	50	266	651	19
2003	1570	1007	51	296	652	8
2004	969	866	85	191	650	-59
2005	932	855	48	153	649	5
2006	1563	983	55	231	650	46
2007	1368	990	89	257	651	-6
2008	999	897	91	191	650	-35
2009	1018	940	76	199	650	15
2010	936	845	69	163	649	-36
2011	762	822	95	112	648	-33
2012	652	675	113	49	643	-130
2013	701	749	91	31	641	-14
2014	606	681	103	29	640	-90
2015	542	711	96	23	637	-45
2016	617	772	76	16	636	45
2017	852	893	77	34	641	140
2018	795	864	82	62	645	75
2019	607	716	102	46	643	-75
2020	433	579	109	26	638	-195

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

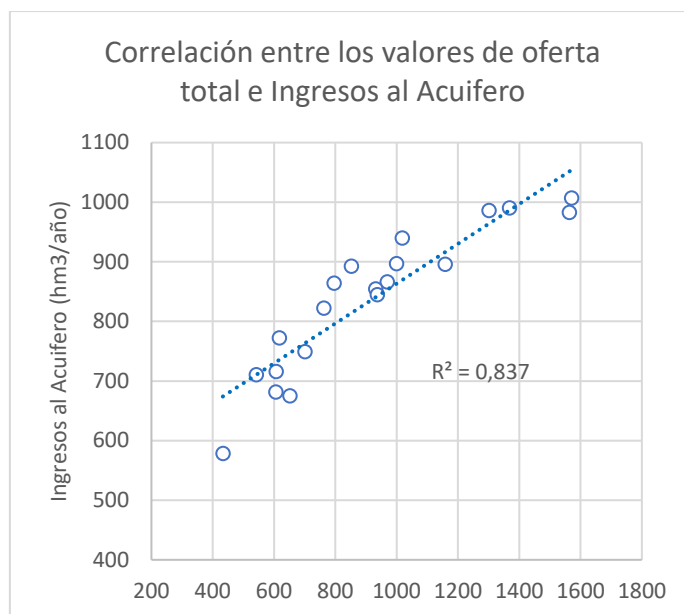


Figura 6-9: Correlación entre los valores de oferta total e Ingresos al acuífero (Atuel)

Balance hídrico proyectado a 2050.

El propósito del análisis prospectivo consiste en evaluar el efecto que genera un cambio en la disponibilidad de agua sobre el balance hídrico del acuífero.

Para el presente estudio se analizan las tendencias de las variables que caracterizan el comportamiento global del sistema. Como dato de entrada se considera la oferta hídrica proyectada para la cuenca del Río Atuel hacia mediados del siglo XXI del estudio: "*Climate change effects, Mendoza*" realizados por: Mekorot 2023, Dr. Amir Givati.

Los valores de Ingreso al acuífero, extracciones y salidas se estiman mediante una correlación lineal entre los mismos y el derrame del Río Atuel. La variación en el almacenamiento se estima mediante la diferencia de los mismos.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 6-12: Balance Hídrico Global proyectado del Acuífero del Río Atuel (2021-2050), en hm³/año

Año	Erogación Proyectada de Valle Grande	Ingresos al acuifero	*Extracciones del acuifero	Derrame de colectores y aporte subsuperficial al Río Atuel	Salidas del acuifero hacia el sur	Variación en el almacenamiento
2021	519	703	99	22	640	-59
2022	843	811	86	111	645	-31
2023	796	795	88	98	644	-35
2024	959	850	81	143	646	-21
2025	587	725	96	41	641	-53
2026	728	772	90	80	643	-41
2027	741	777	90	83	643	-40
2028	825	805	87	106	645	-32
2029	614	734	95	48	642	-51
2030	1006	865	79	156	647	-17
2031	734	775	90	81	643	-40
2032	472	687	101	9	640	-63
2033	514	701	99	21	640	-59
2034	1536	1043	58	302	654	29
2035	626	739	95	52	642	-49
2036	690	760	92	69	643	-44
2037	569	719	97	36	641	-54
2038	824	805	87	106	644	-32
2039	652	747	94	59	642	-47
2040	615	735	95	49	642	-50
2041	924	838	83	133	646	-24
2042	915	835	83	131	646	-25
2043	818	803	87	104	644	-33
2044	618	736	95	49	642	-50
2045	521	703	99	23	640	-59
2046	685	758	92	68	643	-44
2047	643	744	94	56	642	-48
2048	817	802	87	104	644	-33
2049	532	707	98	26	641	-58
2050	596	729	96	43	641	-52

* Extracciones del acuífero (Hm³/ Año) - según registros anteriores.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

6.2.5. PROSPECTIVA HÍDRICA AGUA SUBTERRÁNEA RÍO DIAMANTE

Introducción metodológica del modelo

Con el objetivo de comprender la dinámica del balance hídrico en la cuenca, se llevó a cabo un análisis integral de los flujos de agua, tanto de ingreso como de egreso del acuífero. Los datos correspondientes al período entre 2001 y 2020 se obtienen del Balance Hídrico del Río Diamante.

El modelo contempla todos los procesos hidrológicos que suceden en la cuenca. La fuente principal de abastecimiento de agua es el río Diamante, contemplando las erogaciones de la presa El Tigre. El modelo considera la precipitación que cae sobre toda la cuenca, el agua derivada de riego, las extracciones de agua subterránea, las salidas del acuífero a acuíferos vecinos, identificando dos salidas, una en dirección Sur hacia el Río Atuel y otra en dirección Este y por último contempla la dinámica entre el agua subterránea y la conformación de las vertientes que abastecen una amplia zona al sur de la cuenca.

De este modelo se extraen los datos necesarios para representar el comportamiento global del balance hídrico del agua subterránea, caracterizándolo a través de las variables: ingreso de agua al acuífero, extracciones de agua subterránea, arroyos de manantial o desagües, salidas del acuífero y variación en el almacenamiento.

El modelo contempla al acuífero como un sistema de diversas zonas homogéneas que interactúan entre sí, representando la relación entre el agua subsuperficial y los cauces que la recolectan y conforman arroyos. A los fines de establecer tendencias en el comportamiento de las variables, se agregan todos los procesos que ocurren en cada zona homogénea, con el objetivo de observar el comportamiento global del sistema, tanto en el Balance Hídrico del periodo mencionado con anterioridad, como en el escenario prospectivo de disminución continuada de la oferta hídrica hacia mediados de siglo XXI.

Definición de las variables

A continuación, se presentan las variables a representar:

Oferta Total Estimada

Representa los derrames anuales del Río Diamante a la salida de la presa el Tigre para el periodo 2000 a 2020.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Ingreso de agua al acuífero

Representa la sumatoria de la infiltración del agua de las áreas bajo riego, el agua que precipita sobre la cuenca y que no evapotranspira ni escurre y los aportes del río Diamante que puedan infiltrarse en su lecho.

Extracciones o producción del acuífero

Representa todo el volumen que se extrae del acuífero para riego agrícola, uso poblacional y uso industrial.

Salidas del acuífero

Representa el volumen que fluye más allá de los límites de la zona homogénea estudiada. El modelo considera dos salidas, una hacia la zona homogénea que tiene influencia sobre el Río Atuel, situado al sur y otra salida hacia el este.

Variación en el almacenamiento

Representa la diferencia entre los volúmenes de agua ingresados y los egresos de la cuenca. Un valor negativo, significa una disminución en la cantidad de agua almacenada en la zona estudiada.

Balance hídrico del agua subterránea. Años 2001 a 2020

A continuación, se presenta el escenario base donde se estiman los valores de las variables mencionadas anteriormente. Esto permite establecer relaciones entre ellas con la oferta hídrica total, representada por el escurrimiento del Río Diamante y poder construir el escenario prospectivo.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 6-13: Balance Hídrico global del acuífero Río Diamante (hm³/año)

Año	Derrame Río Diamante	Ingresos al acuífero	Extracciones del acuífero	Arroyos de manantial o desagües	Salidas del acuífero hacia el Sur	Salidas del acuífero hacia el Este	Variación en el almacenamiento
2000	840	574	19	263	167	66	60
2001	1353	1130	28	314	230	117	441
2002	1565	1259	13	648	282	277	39
2003	1707	1186	18	634	281	249	4
2004	1160	1021	24	537	272	225	-37
2005	971	880	14	432	259	185	-10
2006	1748	1228	18	594	276	268	72
2007	1477	1270	11	686	285	273	15
2008	1100	1011	15	544	273	216	-37
2009	1171	1002	27	506	268	209	-9
2010	1062	949	36	433	259	202	18
2011	762	682	47	336	244	146	-92
2012	698	619	49	301	216	138	-84
2013	745	719	41	246	212	158	62
2014	702	703	70	267	216	145	5
2015	660	611	64	280	201	132	-66
2016	883	749	42	241	197	160	108
2017	999	849	29	276	233	184	127
2018	787	686	39	304	237	147	-41
2019	687	622	48	273	219	133	-52
2020	582	549	57	291	199	118	-116

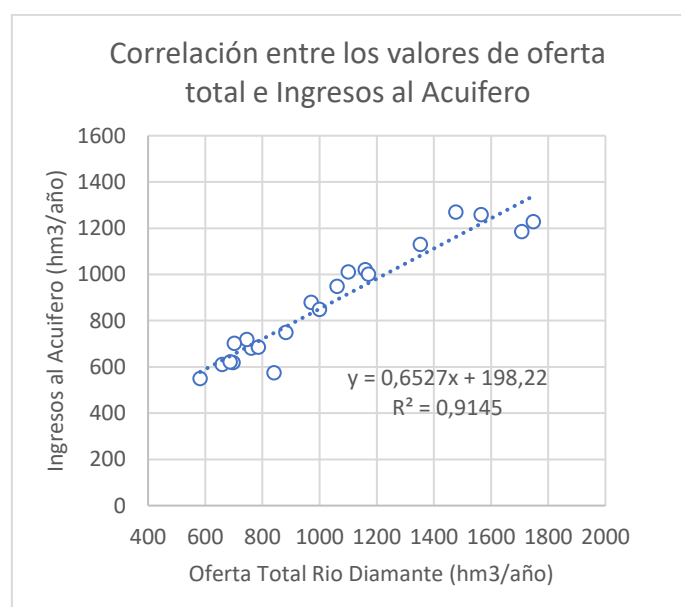


Figura 6-10: Correlación entre los valores de oferta total e Ingresos al acuífero (Diamante)

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Balance hídrico proyectado a 2050.

El propósito del análisis prospectivo consiste en evaluar el efecto que genera un cambio en la disponibilidad de agua sobre el balance hídrico del acuífero.

Para el presente estudio se analizan las tendencias de las variables que caracterizan el comportamiento global del sistema. Como dato de entrada se considera la oferta hídrica proyectada para la cuenca del Río Diamante hacia mediados del siglo XXI del estudio: "*Climate change effects, Mendoza*" realizados por: Mekorot 2023, Dr. Amir Givati.

Los valores de Ingreso al acuífero, extracciones y salidas se estiman mediante una correlación lineal entre los mismos y el derrame del Río Diamante. La variación en el almacenamiento se estima mediante la diferencia de los mismos.

Tabla 6-14: Balance Hídrico Global proyectado del Acuífero del Río Diamante (2021-2050), en hm³/año

Año	Derrame Río Diamante proyectado (hm ³ /año)	Ingresos al acuífero	*Extracciones del acuífero	Arroyos de manantial o desagües	Salidas del acuífero hacia el Sur	Salidas del acuífero hacia el Este	Variación en el almacenamiento
2021	593	585	50	246	212	129	-53
2022	962	826	36	388	238	175	-10
2023	908	791	38	367	234	168	-17
2024	1095	913	31	439	247	191	5
2025	670	636	47	276	218	139	-44
2026	831	741	41	338	229	158	-26
2027	846	750	41	343	230	160	-24
2028	942	813	37	381	236	172	-13
2029	701	656	46	288	220	143	-41
2030	1148	948	29	460	250	197	11
2031	838	745	41	341	229	159	-25
2032	539	550	52	226	209	123	-59
2033	587	581	51	244	212	129	-54
2034	1754	1343	7	692	292	272	81
2035	715	665	46	293	221	144	-39
2036	788	713	43	321	226	153	-31
2037	650	622	48	268	216	136	-47
2038	941	812	37	380	236	172	-13
2039	744	684	45	304	223	148	-36
2040	703	657	46	289	220	143	-40
2041	1055	887	33	424	244	186	0
2042	1045	880	33	420	243	185	-1
2043	934	808	37	377	236	171	-14
2044	706	659	46	290	220	143	-40
2045	595	586	50	247	212	129	-53
2046	783	709	43	319	225	153	-31
2047	735	678	45	301	222	147	-37
2048	933	807	38	377	236	171	-14
2049	608	595	50	252	213	131	-51
2050	681	643	47	280	218	140	-43

* Extracciones del acuífero (Hm³/ Año) - según registros anteriores.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

6.2.6. DISPONIBILIDAD PROYECTADA DE AGUA SUBTERRÁNEA

Los resultados de las Tablas 6.4 - 6.6 - 6.8 - 6.10 – 6.12 se pueden utilizar para realizar estimaciones sobre la variación de almacenamiento futuro frente a diferentes escenarios.

En general para la provincia de Mendoza, las variaciones de almacenamiento de agua en los acuíferos están relacionadas con las variaciones en las condiciones de la recarga. La recarga depende principalmente de los aportes de la cordillera ya sea como recarga desde el medio fracturado o como infiltraciones en los ríos cuando salen al llano.

Las extracciones de agua de agua tienen un impacto relativo a cada acuífero con respecto a su balance, pudiendo variar su impacto en función de las características de cada acuífero, las condiciones de la recarga y la demanda de aguas subterráneas en dicha cuenca, entre otros. En líneas generales, las extracciones no son muy significativas en términos de balance hídrico.

En pos de estimar un orden de magnitud del agua disponible futura para los acuíferos de la provincia se evalúa el impacto de las extracciones para las condiciones analizadas. Para ello se hace una evaluación del volumen de agua que se dejaría de extraer si se simula que no hay extracción de los acuíferos para las series proyectadas.

El volumen que se deja de bombear se denomina “Volumen Acumulado” en una acepción teórica ya que no necesariamente el volumen que se deja de bombear se acumula en el acuífero. Este volumen formará parte de la dinámica propia de cada acuífero y parte de él se acumulará, otra parte podrá surgir por manantiales y otra parte podrá transitar hacia otros acuíferos.

El objetivo de esta determinación es estimar un volumen anual promedio que se pueda extraer de cada acuífero buscando realizar una gestión sostenible de las reservas subterráneas.

Para ello en función de las proyecciones de la oferta y las variaciones de almacenamiento, se calculan los “Volúmenes Acumulados” en cada uno de los acuíferos suponiendo una condición de bombeo nulo, Tablas 6-15, 6-16, 6-17, 6-18 y 6-19.

Tabla 6-15: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Tunuyán Superior (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm³

Tunuyán Superior			
Año	Oferta proyectada en 5 años	Variación del almacenamiento en 5 años	Volumen acumulado
2025	5.977	2.704	2.704
2030	5.582	2.560	5.265
2035	5.705	2.605	7.870
2040	4.961	2.334	10.204
2045	4.601	2.203	12.407
2050	4.360	2.115	14.521

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 6-16: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Tunuyán Inferior (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm³

Tunuyán Inferior			
Año	Oferta proyectada en 5 años	Variación del almacenamiento en 5 años	Volumen acumulado
2025	5.498	1.374	1.374
2030	5.623	1.376	2.750
2035	6.192	1.374	4.124
2040	5.100	1.406	5.530
2045	5.841	1.400	6.930
2050	4.917	1.421	8.351

Tabla 6-17: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Mendoza (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm³

Mendoza			
Año	Oferta proyectada en 5 años	Variación del almacenamiento en 5 años	Volumen acumulado
2025	5.546	1.207	1.207
2030	5.859	1.206	2.413
2035	5.814	1.206	3.619
2040	5.017	1.208	4.827
2045	5.684	1.206	6.033
2050	4.902	1.209	7.242

Tabla 6-18: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Atuel (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm³

Atuel			
Año	Oferta proyectada en 5 años	Variación del almacenamiento en 5 años	Volumen acumulado
2025	3.704	252	252
2030	3.913	261	513
2035	3.883	260	773
2040	3.350	236	1.009
2045	3.796	256	1.264
2050	3.274	232	1.497

Tabla 6-19: Volumen de almacenamiento acumulado en el acuífero Diamante (asumiendo que no hay producción de agua subterránea), en hm³

Diamante			
Año	Oferta proyectada en 5 años	Variación del almacenamiento en 5 años	Volumen acumulado
2025	4.229	85	85
2030	4.468	103	188
2035	4.433	101	288
2040	3.826	53	342
2045	4.334	93	434
2050	3.738	46	481

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

En función de lo anterior, se calcula el volumen que podría acumularse en los acuíferos en periodos de 10 años, al 2030, al 2040 y al 2050.

El volumen acumulado resulta directamente de la recarga del acuífero, por lo tanto, para mantener una gestión sostenible del acuífero, la producción de agua subterránea durante un período de tiempo debe ser igual al volumen acumulado en el mismo período de tiempo. En la Tabla 6-20, se propone un volumen de extracción por año para cada acuífero.

Tabla 6-20: Producción de agua subterránea recomendada en hm³

Año	2030		2040		2050	
	Volumen acumulado en 10 años	Producción media anual recomendada de agua subterránea	Volumen acumulado en 10 años	Producción media anual recomendada de agua subterránea	Volumen acumulado en 10 años	Producción media anual recomendada de agua subterránea
Mendoza	2.413	241	4.827	241	7.242	242
Tunuyán Inferior	2.136	214	4326	219	6.586	226
Tunuyán Superior	5.265	526	10.204	493	14.521	432
Atuel	513	51	1.009	50	1.497	49
Diamante	188	19	342	15	481	14

En la actualidad la información disponible sobre las extracciones de aguas subterráneas es dispar. En algunas cuencas es precisa como en el Tunuyán Superior y parte del Río Mendoza (Margen Derecha) y en otras el nivel de incertidumbre es mayor, si bien se han hecho estimaciones en base a los consumos de energía.

El volumen de agua que se extrae de los acuíferos es un aspecto muy relevante en el cual la provincia debe trabajar para mejorar el nivel del conocimiento de las extracciones, sobre todo pensando en adaptarse a los escenarios futuros.

El principal usuario del agua subterránea es la agricultura donde todavía muchos usuarios no tienen sistemas de riego tecnificados. La tecnificación, podría reducir sus demandas de agua.

Aquellos usuarios que hacen uso exclusivo del agua subterránea posiblemente aumenten las extracciones para compensar al aumento de demanda hídrica de los cultivos, debido al aumento de temperatura.

Por otro lado, los usuarios que hacen un uso conjunto del agua superficial y el agua subterránea son los que, ante los escenarios futuros con una menor oferta superficial, aumentarían las extracciones de agua de los acuíferos buscando mitigar los efectos de la disminución de la oferta hídrica. De este modo los acuíferos se verán impactados por la menor recarga y por el aumento de las extracciones.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Estos cambios en la recarga y los bombeos pueden inducir alteraciones en los acuíferos que afectarían tanto la cantidad (almacenamiento) como la calidad del agua.

Cada acuífero la provincia tiene su comportamiento particular dado por sus características intrínsecas, por las condiciones de la recarga, la relación con los escurrimientos superficiales, etc. Como recomendación general podemos sugerir que no deberían aumentarse las extracciones en forma indiscriminada hasta que no se tenga conocimiento detallado del funcionamiento de cada uno de los acuíferos.

Los acuíferos de la Cuenca Norte (Río Mendoza y Río Tunuyán Inferior) tienen un uso intensivo con un importante uso conjunto (complementarios) del agua superficial y subterránea, pudiendo debido a esto aumentar las extracciones a futuro en escenarios de escasez. En el Río Mendoza particularmente ha aumentado de manera relevante en los últimos años la extracción de agua subterránea para el abastecimiento poblacional, siendo el acuífero la gran reserva estratégica de agua para el futuro del mayor núcleo urbano de la provincia. En el Río Tunuyán Inferior, el abastecimiento poblacional depende 100% del agua subterránea.

En el Río Tunuyán Superior, la variación de almacenamiento es decreciente desde hace varios años debido a la reducción de la recarga. En esta cuenca hay una gran cantidad de hectáreas que depende exclusivamente del uso del agua subterránea (33.000 ha), además del abastecimiento de las poblaciones.

Para los oasis de la zona sur de la provincia, cuenca del Río Diamante, cuenca del Río Atuel y cuenca del Río Malargüe, el uso del agua subterránea no es muy relevante, pero es probable que aumente de manera significativa en el futuro. Al mismo tiempo el conocimiento que se tiene de los acuíferos en la actualidad es bajo. Por lo tanto, se sugiere que se realicen estudios para conocer en detalle el comportamiento de los acuíferos antes de aumentar las extracciones de agua.

Los volúmenes de extracción propuestos son una referencia que busca no alterar los acuíferos de manera significativa. Estos volúmenes propuestos podrán ser revisados y actualizados en virtud de los estudios que se desarrollen y del mejor entendimiento de la dinámica hídrica.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

6.3. AGUA TRATADA

El potencial de agua tratada para uso en agricultura limitada depende del crecimiento poblacional, tomando en cuenta que el agua que recibe la población (después de las pérdidas) se multiplica por 0,66.

Tabla 6-21: Volumen potencial de agua tratada 2030, 2040 y 2050, en hm³/año

Década	2022		2030		2040		2050	
Cuenca	Demanda Potable Neta	Volumen potencial tratado	Demanda Potable Neta	Volumen potencial tratado	Demanda Potable Neta	Volumen potencial tratado	Demanda Potable Neta	Volumen potencial tratado
Mendoza	167,3	110,4	180,6	119,2	195,1	128,8	210,9	139,2
Tunuyán Superior	18,0	11,9	19,8	13,1	21,8	14,4	23,9	15,8
Tunuyán Inferior	35,8	24	38,7	26	41,7	28	44,9	30
Diamante	19,5	12,9	20,6	13,6	21,7	14,3	22,9	15,1
Atuel	14,0	9,3	14,7	9,7	15,4	10,2	16,1	10,6
Malargüe	4,3	2,8	4,6	3,1	5,1	3,3	5,5	3,6
Total	<u>258,8</u>	<u>170,8</u>	<u>279,1</u>	<u>184,2</u>	<u>300,8</u>	<u>198,5</u>	<u>324,2</u>	<u>213,9</u>

El volumen potencial de agua tratada alcanzará unos 214 Hm³ en 2050.

La siguiente tabla presenta la capacidad de tratamiento actual en la provincia.

Tabla 6-22: capacidad de tratamiento actual en la provincia, en hm³/año

Cuenca	Volumen	2030	2040	2050
Mendoza	106	119,2	128,8	139,2
Tunuyán Superior	4	13,1	14,4	15,8
Tunuyán Inferior	12	26	28	30
Diamante	5	13,6	14,3	15,1
Atuel	4	9,7	10,2	10,6
Malargüe	0	3,1	3,3	3,6
TOTAL	<u>131</u>	<u>184</u>	<u>199</u>	<u>214</u>
Falta	-	<u>53</u>	<u>68</u>	<u>83</u>

Para aprovechar todo el potencial del agua tratada, se deberían añadir 83 Hm³ adicionales.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

6.4. RESUMEN DEL AGUA DISPONIBLE PROYECTADA

La siguiente tabla presenta un resumen de las proyecciones de agua disponible en Mendoza.

Tabla 6-23: Resumen Del Agua Disponible Proyectada (Hm³)

Década	Fuente	Mendoza	Atuel	Diamante	Malargüe	Tunuyán	Total, Provincia
2030	Agua Superficial	1.506	1.006	1.148	329	1.551	5.540
	*Agua Subterránea	241	51	19	-	740	1.051
	**Agua Tratada	119	10	14	3	39	184
	Total Cuenca	1.867	1.067	1.181	332	2.330	6.775
2040	Agua Superficial	922	615	703	202	830	3.272
	*Agua Subterránea	241	50	15	-	712	1.018
	Agua Tratada	129	10	14	3	42	199
	Total Cuenca	1.292	675	732	205	1.584	4.489
2050	Agua Superficial	893	596	681	195	857	3.222
	*Agua Subterránea	242	49	14		658	963
	Agua Tratada	139	11	15	4	45	214
	Total Cuenca	1.273	656	710	199	1.560	4.399

* Aguas Subterráneas según la gestión sostenible del acuífero

** Agua Tratada - potencial, excede la capacidad de tratamiento actual

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

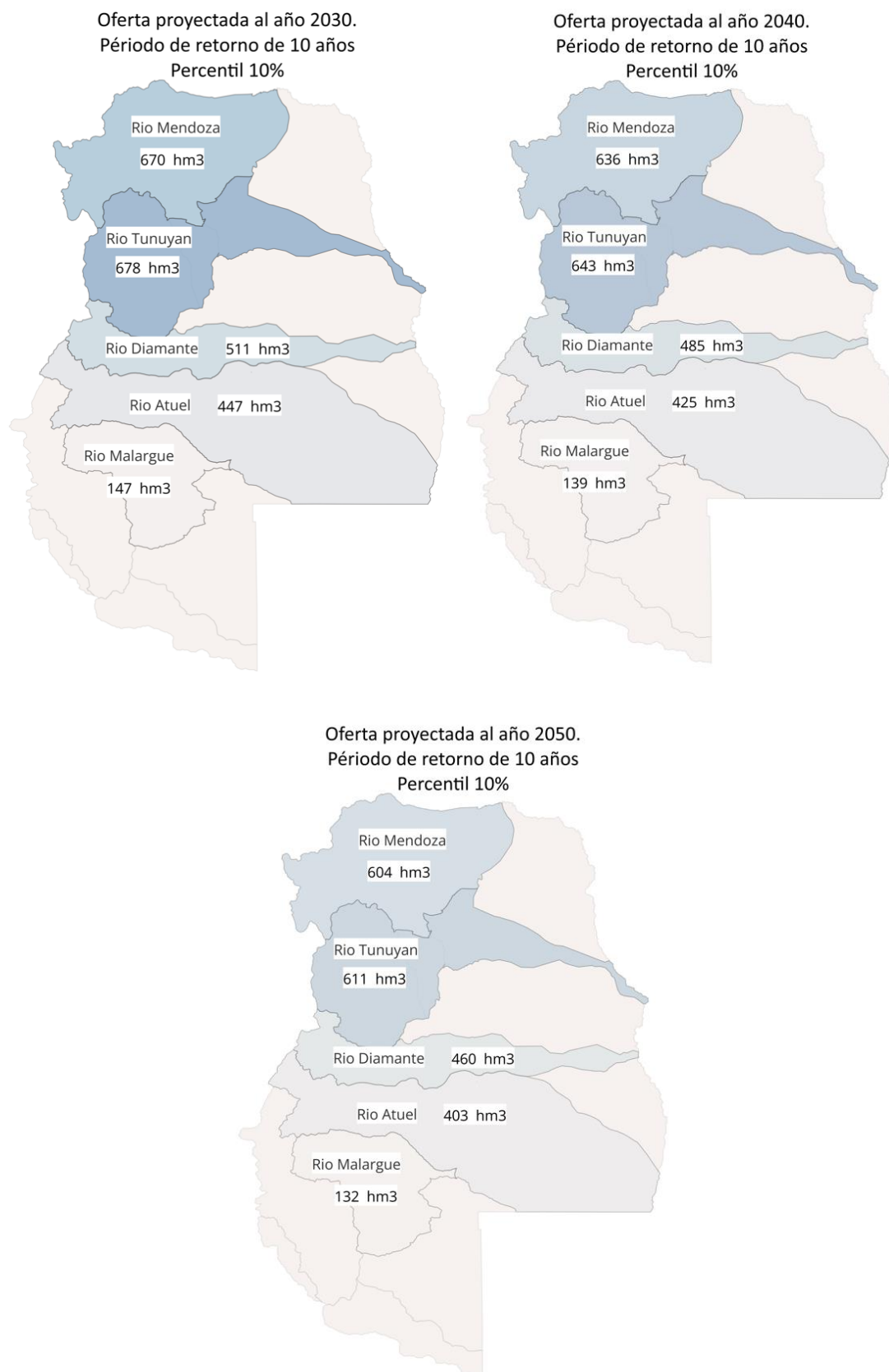


Figura 6-11: Oferta proyectada de Agua Superficial, periodo de retorno de 10 años, percentil del 10%

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

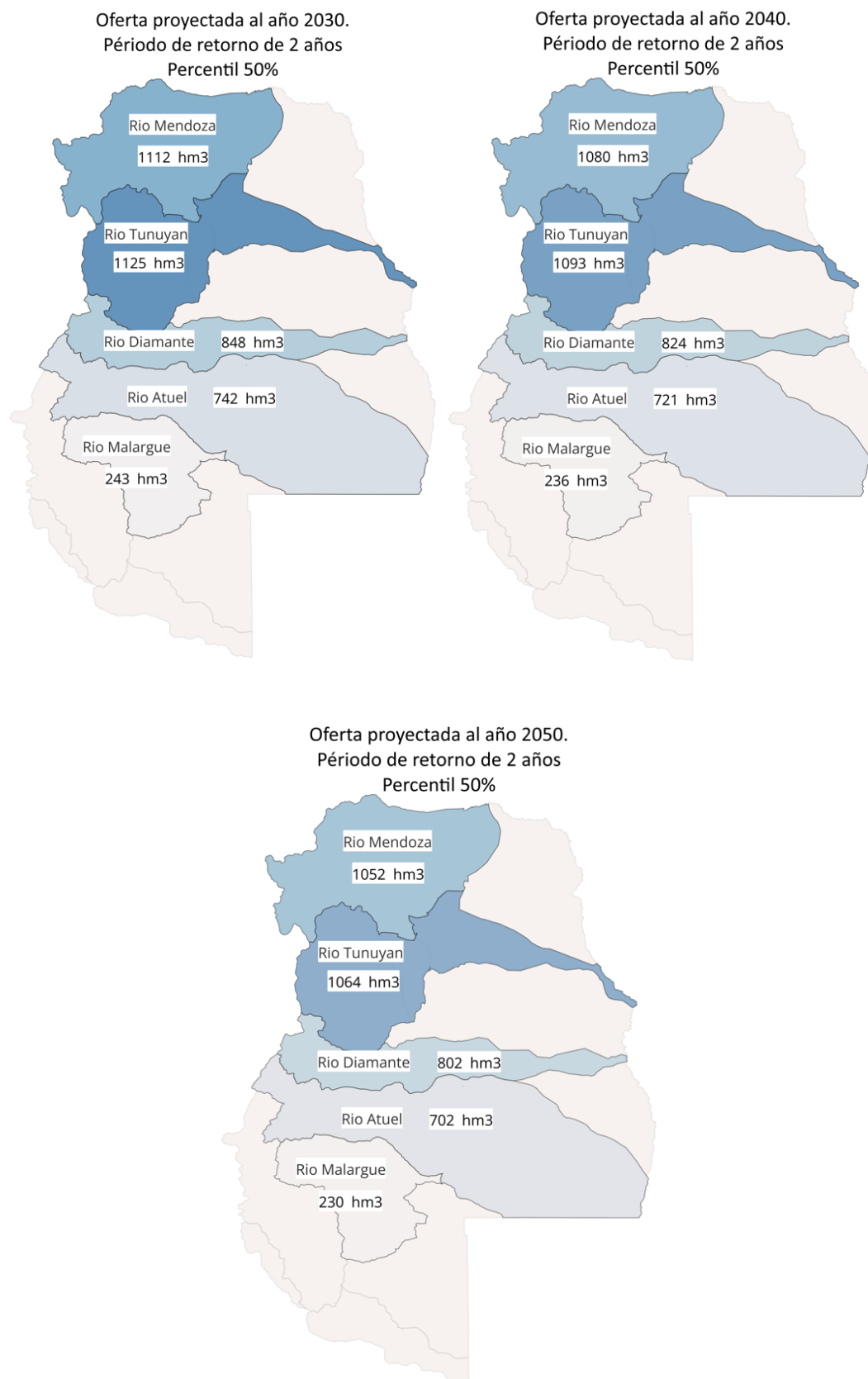


Figura 6-12: Oferta proyectada de Agua Superficial, periodo de retorno de 2 años, percentil del 50%

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

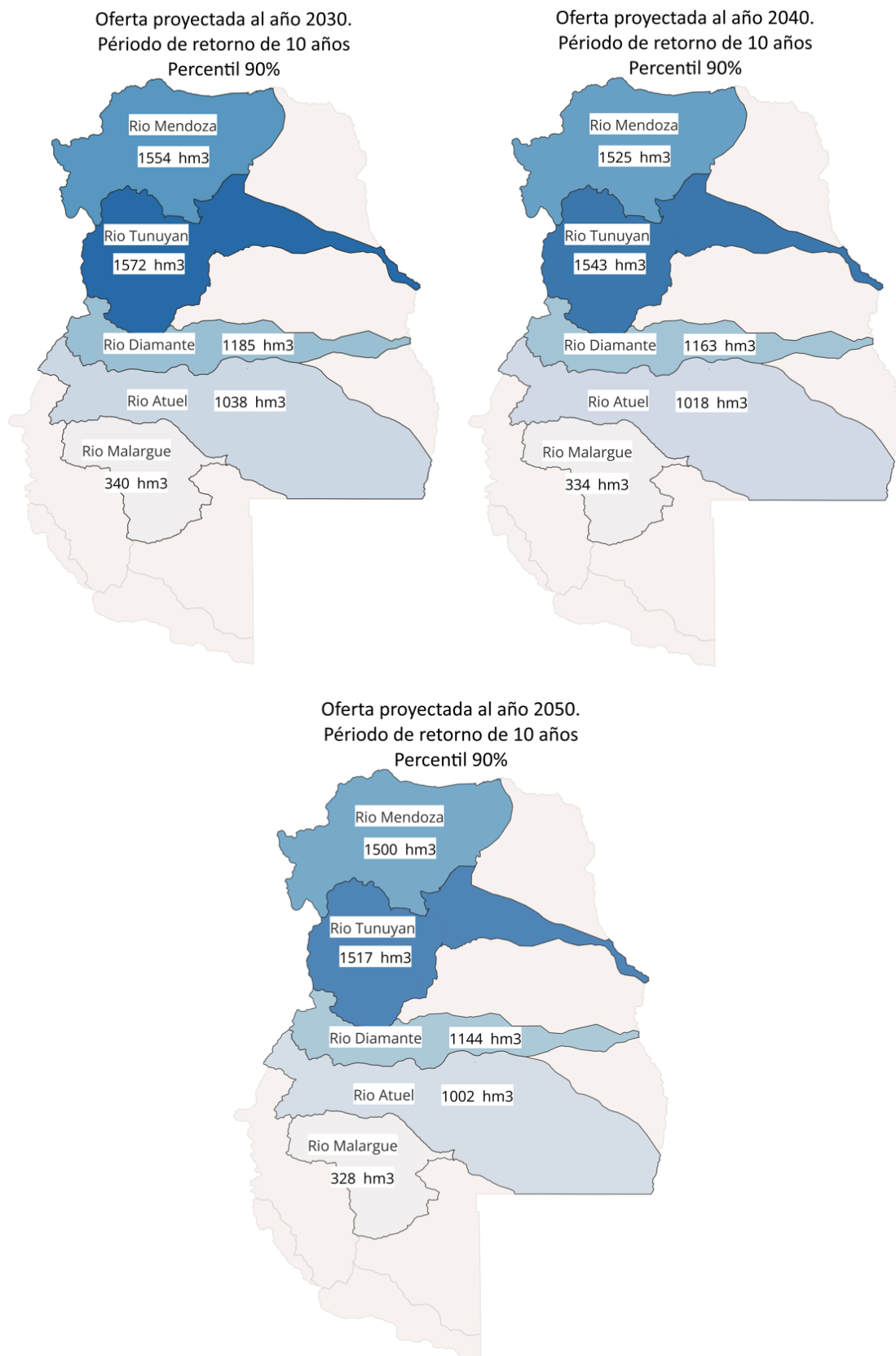


Figura 6-13: Oferta proyectada de Agua Superficial, periodo de retorno de 2 años, percentil del 90%

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

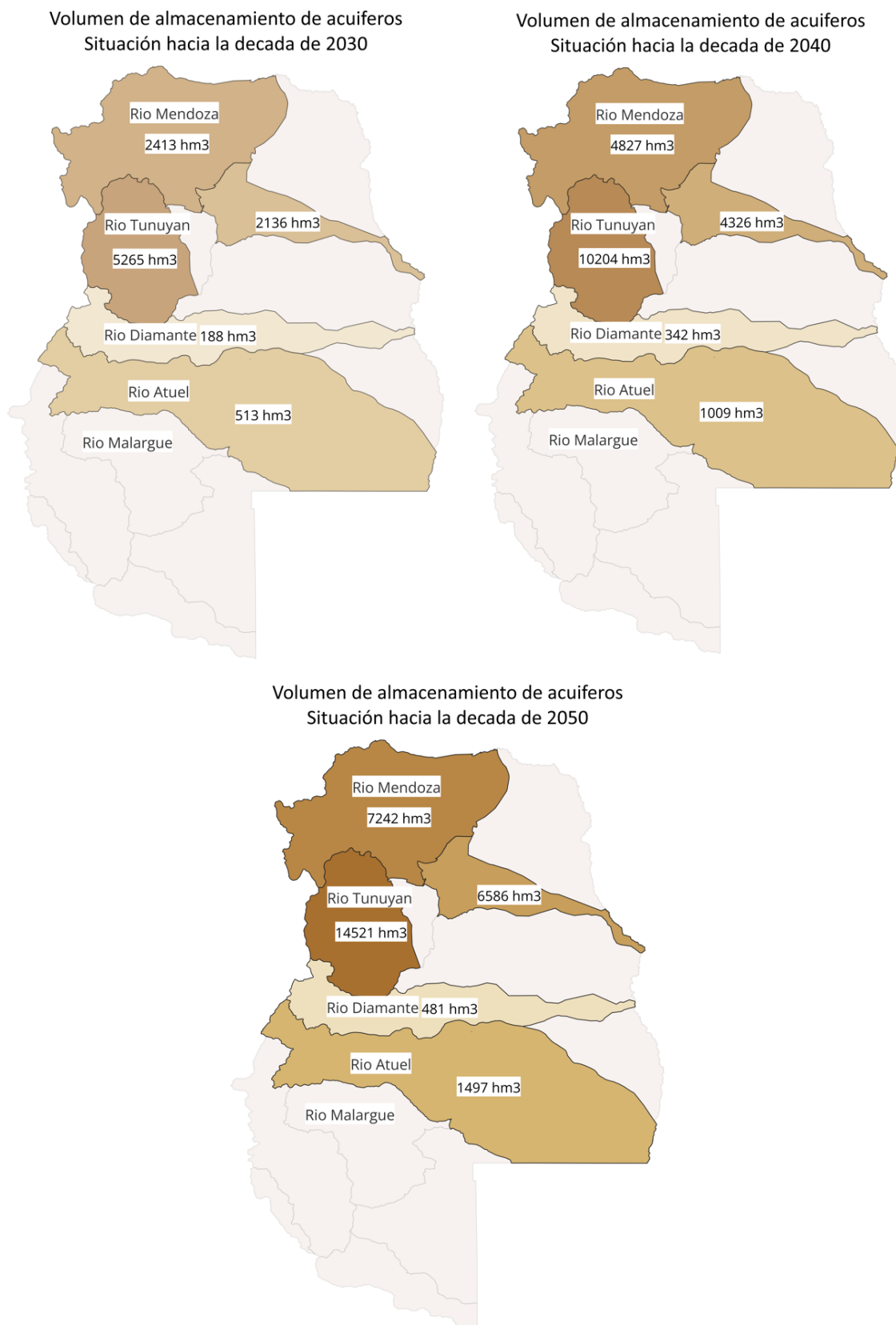


Figura 6-14: Volumen Acumulado De Agua Subterránea Proyectado

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

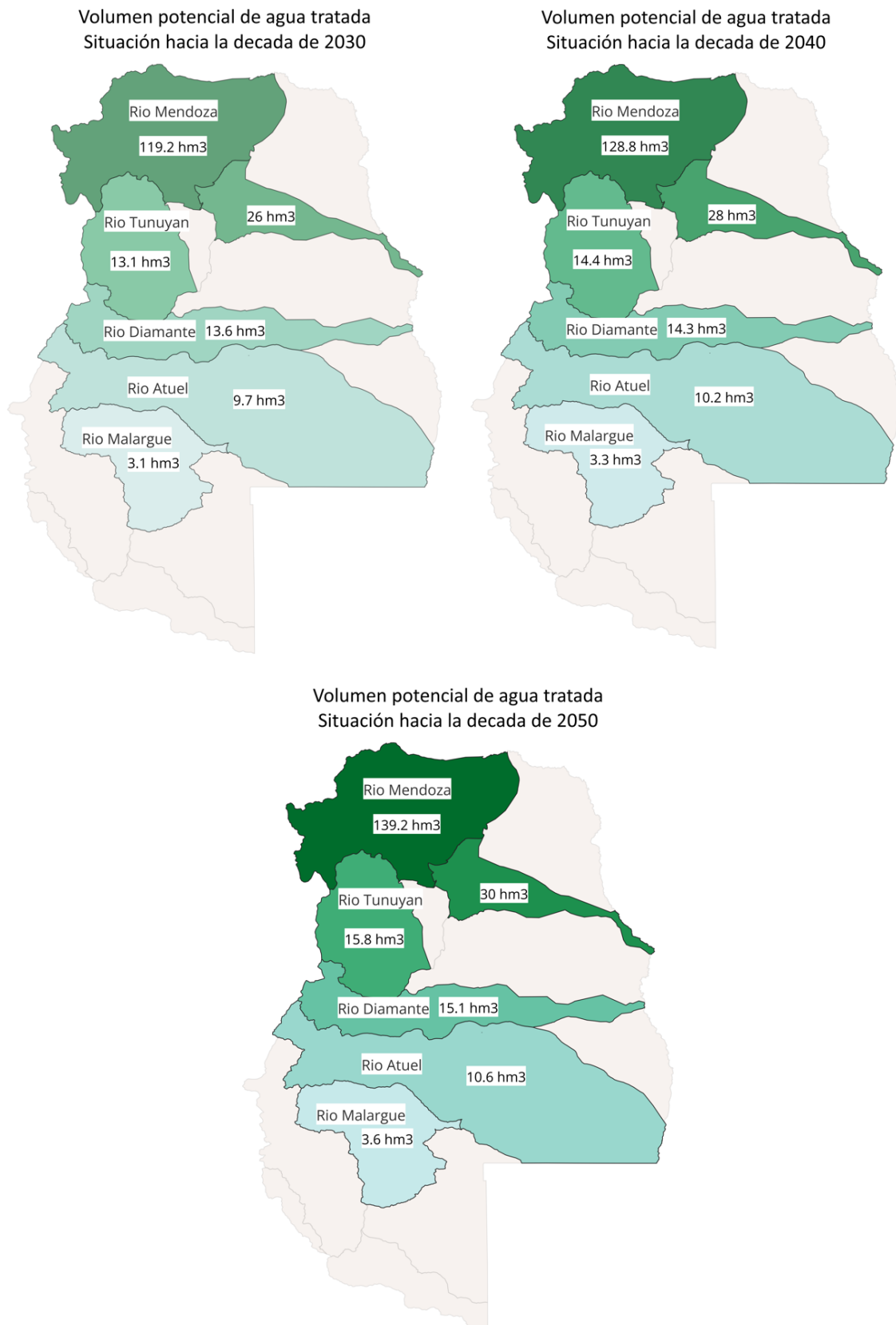


Figura 6-15: Volumen de agua tratada proyectado

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

7. CONCLUSIONES

7.1. AGUA SUPERFICIAL

Se puede inferir que la disponibilidad de agua superficial disminuirá debido a los efectos del cambio climático, en los próximos 30 años (ver tabla 7-1).

El análisis estadístico indica que la probabilidad de que ocurra un año abundante (más de 5.500 hm³) es de una vez cada 10 años (percentil 90%). Si se compara este volumen anual con la capacidad de almacenamiento existente (1.500 hm³), la provincia deberá prepararse para gestionar estos volúmenes en consecuencia.

Por otro lado, un año seco de menos de 2.500 Hm³ se producirá una vez cada 10 años, y la provincia tendrá que desarrollar otros recursos hídricos para compensar la falta de agua superficial en caso de que no pueda almacenar los excedentes de los años buenos.

Tabla 7-1: Cambios previstos en el agua disponible en la provincia de Mendoza para los diferentes períodos con respecto al período 2000-2020

Periodo	Promedio anual de AW en Mendoza (HM ³)	Cambio (%) con Respecto a 2000-2020
2000-2020	4.656	
2030	4.330	-7,90%
2050	4.121	-13,20%
2070	3.539	-24,90%

7.2. AGUA SUBTERRÁNEA

Para obtener una mejor comprensión del almacenamiento y el equilibrio del agua subterránea y explorar la producción potencial de agua subterránea profunda para prepararse para las próximas décadas, se recomienda encarecidamente:

- ✚ Incrementar la coherencia y continuidad del registro de datos del nivel freático. Esto se puede lograr, por ejemplo, repitiendo las mediciones en períodos cortos de tiempo para su validación, asegurando que las mediciones anuales se realicen en los mismos pozos o manteniendo un registro de la distancia desde cada medición hasta el pozo activo más cercano durante la medición.
- ✚ Adquirir un mayor conocimiento del rendimiento específico en los distintos acuíferos, para reducir sus incertidumbres. Esto puede requerir la realización de pruebas de bombeo exhaustivas.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

- ✚ Reunir un registro completo de datos sobre la calidad del agua subterránea (particularmente niveles de CE, cloruro y nitrato) a lo largo de los años.
- ✚ Modelizar la recarga superficial natural y antropogénica en las cuencas norte y sur.
- ✚ Separar la recarga recurrente de manantiales distribuidos en toda el área de la cuenca centro, de la recarga recurrente de manantiales situados en los bordes de la cuenca, para excluir a estos últimos del componente de infiltración en el modelo WEAP.
- ✚ Examinar la distribución de los manantiales más allá de la extensión de las áreas de recarga administradas, su volumen de salida y trayectorias.
- ✚ Explorar posibles entradas de agua subterránea desde el subsuelo, como un sistema acuífero profundo que recargue el acuífero superior.
- ✚ Recopilar un conjunto de datos completo sobre la profundidad de bombeo a lo largo de los años, junto con la distribución espacial en toda el área.
- ✚ Recopilar datos hidrogeológicos y de calidad del agua de la parte profunda del acuífero, actualmente no utilizada. Dichos datos pueden usarse para arrojar luz sobre las propiedades de la sección profunda, su posible distribución espacial regular/irregular, si es adecuada para la producción de agua subterránea y cuál es el volumen potencial de almacenamiento de agua subterránea de alta calidad.
- ✚ Mejorar el conocimiento con respecto a los volúmenes de agua que se extraen de los acuíferos. Esto permitirá confirmar los modelos conceptuales adoptados, mejorar las proyecciones futuras y facilitar la adaptación ante nuevos escenarios.

En función de lo anterior es que se decidió utilizar los modelos WEAP que había generado el propio DGI respetando los modelos conceptuales adoptados para hacer las proyecciones sobre el agua subterránea.

Los volúmenes de extracción propuestos son una referencia que busca no alterar los acuíferos de manera significativa.

Estos volúmenes propuestos podrán ser revisados y actualizados en virtud de los estudios que se desarrollen y del mejor entendimiento de la dinámica hídrica.

Esta sugerencia busca implementar una gestión sostenible del agua subterránea en la provincia y para ello se recomienda no superar los volúmenes presentados en la Tabla 7-2 hasta avanzar en el conocimiento de los acuíferos.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Tabla 7-2: Volúmenes recomendados de producción de agua subterránea, en hm³/año

Año	2030	2040	2050
Cuenca	Producción media recomendada de agua subterránea	Producción media recomendada de agua subterránea	Producción media recomendada de agua subterránea
Mendoza	241	241	242
Tunuyán Inferior	214	219	226
Tunuyán Superior	526	493	432
Atuel	51	50	49
Diamante	19	15	14
Total	<u>1.051</u>	<u>1018</u>	<u>963</u>

Las recomendaciones del acuífero Malargüe se presentarán luego de actualizar el modelo en esa área.

7.3. AGUA TRATADA

Actualmente la Provincia de Mendoza utiliza una parte del agua tratada para riego. Sin embargo, en el futuro, los volúmenes de aguas residuales aumentarán con relación al crecimiento de la población y las instalaciones existentes no podrán tratar los volúmenes pronosticados, la siguiente tabla presenta el potencial de agua tratada proyectado y la capacidad de tratamiento faltante (en Hm³).

Tabla 7-3: Volúmenes potenciales de agua tratada, en hm³/año

Cuenca	Volumen	2030	2040	2050
Mendoza	106	119,2	128,8	139,2
Tunuyán Superior	4	13,1	14,4	15,8
Tunuyán Inferior	12	26	28	30
Diamante	5	13,6	14,3	15,1
Atuel	4	9,7	10,2	10,6
Malargüe	0	3,1	3,3	3,6
TOTAL	<u>131</u>	<u>184</u>	<u>199</u>	<u>214</u>
Falta	-	<u>53</u>	<u>68</u>	<u>83</u>

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

8. BIBLIOGRAFÍA

Chen, X., Song, J., and Wang, W. (2010) Spatial variability of specific yield and vertical hydraulic conductivity in a highly permeable alluvial aquifer. *Journal of Hydrology*, Volume 388, Issues 3–4, p. 379-388. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.05.017.

Harter, T. (2005) Specific yield storage equation. *Water Encyclopedia* (editors J.H. Lehr and J. Keeley). DOI:10.1002/047147844X.gw1086.

Hernández, J. and Martinis, N. (2006) Particularidades de las cuencas hidrogeológicas explotadas con fines de riego en la provincia de Mendoza. III Jornadas de Actualización en Riego y Fertilización. Mendoza, Argentina.

Departamento General de Irrigación, Balances Hídricos, Cuencas Río Mendoza, Río Tunuyán, Río Diamante, Río Atuel y Río Malargüe (2015 – 2022)

Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A. N., Alipoor, A., Joodavi, A., and Brusseau, M. L. (2014) A framework toward developing a groundwater conceptual model. *Arabian Journal of Geosciences*, Volume 7, p. 3611–3631. DOI:10.1007/s12517-013-0971-9.

Johnson, A. I. (1963) Specific yield - compilation of specific yields for various materials. USGS, Denver, Colorado.

Lv, M., Xu, Z., Yang, Z.-L., Lu, H., and Lv, M. (2021) A comprehensive review of specific yield in land surface and groundwater studies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2020MS002270. DOI:10.1029/2020MS002270.

Poblete, M. and Ferre, J. (1981) Determinación del área correspondiente al acuífero libre en la cuenca subterránea Diamante-Atuel, Provincia de Mendoza. Technical Publication No. P-229, CRAS.

Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., et al. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nat. Geosci.* 12, 802–808. doi: 10.1038/s41561-019-0432-5.

Doyle, M. E. (2020). Observed and simulated changes in precipitation seasonality in Argentina. *Int. J. Climatol.* 40, 1716–1737. doi: 10.1002/joc.6297.

Lindström, G., Pers, C.P., Rosberg, R., Strömquist, J., Arheimer, B. 2010. Development and test of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model – A water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research*, 41.3-4:295-319.

Informe 2.1 - Proyecciones de la Oferta

Rivera JA, Naranjo Tamayo E and Viale M (2020) Water Resources Change in Central-Western Argentina Under the Paris Agreement Warming Targets. *Front. Clim.* 2:587126. doi: 10.3389/fclim.2020.587126.

Rivera, J. A., and Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: climatic features and long-term trends (1901-2014). *Atmosph. Res.* 241:104953. doi: **10.1016/j.atmosres.2020.104953**.

Rivera JA, Otta S, Lauro C and Zazulie N (2021) A Decade of Hydrological Drought in Central-Western Argentina. *Front. Water* 3:640544. doi: 10.3389/frwa.2021.640544.

Maenza, R. A., Agosta, E. A., and Bettolli, M. L. (2017). Climate change and precipitation variability over the western 'Pampas' in Argentina. *Int. J. Climatol.* 37, 445–463. doi: 10.1002/joc.5014.