



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA Y TURISMO

TESIS DE DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

CAUDAL AMBIENTAL EN EL SITIO RAMSAR
LAGUNAS DE GUANACACHE, DESAGUADERO Y
DEL BEBEDERO, ARGENTINA

Luis Bernardo Bastidas Mejía

Directora: Dra. María Cintia Piccolo

Codirector: MC. Alberto I. J. Vich

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2022

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Geografía, de la Universidad Nacional del Sur (UNS) y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo durante el período comprendido entre el 08 de mayo de 2018 y el 04 de octubre de 2022, bajo la dirección de la Dra. María Cintia Piccolo (CONICET/UNS) y la codirección del MC. Alberto I. J. Vich (CONICET/UNCUYO).

Geóg. Luis Bernardo Bastidas Mejía

Departamento de Geografía y Turismo

Universidad Nacional del Sur

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET, por cuyo apoyo a través de la beca interna doctoral desde abril de 2018, fue posible el desarrollo de mi programa de formación de posgrado y la consecución de esta Tesis de Doctorado.

Al Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales IANIGLA, por representar el espacio físico y académico de excelencia para el desenvolvimiento profesional del plan de estudios.

A mi directora de tesis, Dra. María Cintia Piccolo, cuya guía profesional y personal representó siempre la excelencia académica y el apoyo necesario para la consecución del trabajo de investigación.

A mi codirector de tesis, MC. Alberto I. J. Vich, el cual representó el eslabón profesional inicial y de trayectoria para la propuesta, desarrollo y finalización de la tesis.

A mis compañeros y amigos del grupo de Ecología y Manejo de Cuencas del IANIGLA: Dra. Carolina Lauro, Dr. Sebastián Otta y Dra. Emilce Vaccarino, así como a los profesionales de apoyo a la investigación Flavio Fernández y Juan Ortubia, por cuyo constante apoyo personal, logístico, académico y profesional, se propició un ambiente de cordura y profesionalismo dentro del instituto.

A mis tíos y primos, en especial a mi mamá Edisabel, la cual, a pesar de las largas y duras distancias forzadas durante años, ha representado siempre la piedra angular para seguir adelante, motivándome fuertemente en el desarrollo de mis objetivos y alentando a mi pasión por la Geografía, que orgullosamente alimento desde la niñez.

A Roger, mi compañero de vida, por su inagotable e incondicional fuente de apoyo constante, crucial para llevar a cabo este trabajo, lleno de incertidumbres y grandes gratificaciones.

A mis amigos, compañeros del instituto y de cursado y a todas aquellas personas que de una u otra forma colocaron simpatía y buena reciprocidad durante mis años como doctorando.

A mi patria adoptiva, Argentina y a la tierra que me recibió amablemente: Mendoza, por representar el ámbito de oportunidad única para desarrollar mi sueño académico y de vida.

Para todos, mi más profundo y sincero agradecimiento.

I
*Si los ríos no volvieran
volvería el arenal
la culebra de Cienfuegos
las leguas del secanal
así ha sido, no volvieron, ni tampoco volverán.*

II
*Los ríos muertos
son peces de arena
de su silencio comió el arenal
en Guanacache la pena
es una pena de arena
que vela al polvaredal.*

III
*Cuando los ríos no vuelven
la vida no vuelve más
el que mata un río mata
todo lo que va a empezar
al asesino del río, lo secó la soledad.
Abran compuertas
liberen los ríos
que en Guanacache se mueren de sed
hagan paisaje al paisaje
que en el ramaje del aire
la vida quiere volver.*

Réquiem por Guanacache

Compuesta por: *Armando Tejada Gómez / Daniel Talquenca*
Voz: *María Eugenia Fernández*



YouTube QR



Spotify QR

RESUMEN

Definido por la Declaración de Brisbane de 2018, los caudales ambientales representan la cantidad, frecuencia, calidad y niveles de agua necesarios para sostener ecosistemas acuáticos, los cuales a su vez sustentan culturas, economías, formas de vida sustentables y bienestar social. El área de estudio, localizado a sotavento de la cordillera de los Andes, es el sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Se localiza entre los 34°06' S y 32°00' S y los 68°42' O y 66°24' O, (centro-oeste de la República Argentina). Esta región, caracterizada por su aridez, es regada por escurrimientos andinos, principalmente desde los ríos Mendoza, San Juan y Tunuyán. El sitio Ramsar representa un área de humedales cuyos ecosistemas y sociedades han sido perjudicados por la sobreexplotación del agua en los oasis. Para esta zona, es imprescindible la aplicación de los caudales ambientales, hecho posible mediante un consenso económico y un marco legal estricto que ampare la protección de estos espacios de humedales de zonas áridas.

Dada la aridez natural, las actividades humanas en los oasis aguas arriba del sitio restringen las escorrentías al sitio Ramsar, por lo que es importante el estudio de los caudales ambientales. En estos términos, se analizaron múltiples metodologías (de tipo hidrológico), cuyas bondades radican en la capacidad de emular los ciclos hidrológicos naturales, destacando los métodos del Caudal de Mantenimiento, NGPRP (método del programa de las grandes llanuras septentrionales) y el método de la propuesta de modificación de la Ley argentina N.º 25688. Ante la aplicación de estas metodologías y como aporte científico relevante, se propuso una modificación que considerara las extensas distancias entre el sitio Ramsar y las estaciones de aforo aguas arriba, teniendo en cuenta de esta forma las pérdidas por infiltración y evapotranspiración en cauces.

Por otra parte, se estudió el estado del balance hídrico regional, cuyos déficits denotan la sobreexplotación del recurso en los oasis aguas arriba. Asimismo, se analizó la relación sociedad-naturaleza dentro del sitio Ramsar, cuyos valores y cultura son alcanzados por los objetivos de los caudales ambientales. Asimismo, se determinaron los alcances y recomendaciones derivados de la declaración de Brisbane del año 2018, su vinculación con los objetivos del desarrollo sostenible y los escenarios relacionados al cambio climático, asociados al informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2021).

Como conclusión, en la investigación se comprobó la alteración antrópica de los caudales afluentes al sitio Ramsar, siendo responsable de su degradación socioambiental. Por otra parte, los vínculos con el clima regional, su variabilidad y sus proyecciones (cambio climático) representan uno de los principales desafíos para la conservación de este espacio protegido. De esta forma y como propuesta, las opciones de restauración deben involucrar herramientas ambientales, económicas, legales y sociales (enmarcados dentro de las recomendaciones de implementación de los caudales ambientales), las cuales permitan un adecuado balance de consumo de agua para las sociedades y ecosistemas en la región.

ABSTRACT

Defined Brisbane Declaration set in 2018, environmental flows represent the quantity, timing, and quality of freshwater flows and levels necessary to sustain aquatic ecosystems (e.g., wetlands), which, in turn, support human cultures, economies, sustainable livelihoods, and well-being. The study area, located on the leeward side of the Andes Mountains, is the Ramsar site Lagunas de Guanacache, Desaguadero and Bebedero. It is located between 34°06' S and 32°00' S, and 68°42' W and 66°24' W, (central-western Argentina). This region, characterized by its aridity, is irrigated by Andean runoff, mainly from the Mendoza, San Juan and Tunuyán rivers. The Ramsar site represents an area whose wetlands ecosystems and societies have been harmed by overexploitation of water in the oases. Implementing environmental flows is essential for this area, made possible through economic consensus and a strict legal framework to protect these arid zone wetland areas.

Given the natural aridity, human activities in the oases upstream of the site restrict runoff to the Ramsar site, so the importance of environmental flows begins to apply. Multiple hydrological methodologies were analyzed, whose benefits lie in the ability to emulate natural hydrological cycles. The most accurate methods assessed were Maintenance Flow, NGPRP (method of the Great Northern Plains Program) and the method of the proposed amendment of the Argentine Law No. 25688. Given the application of these methodologies and as a relevant scientific contribution, a modification was proposed to consider the long distances between the Ramsar site and the upstream gauging stations. The proposal aimed to consider the water losses due to infiltration and evapotranspiration in watercourses.

On the other hand, the state of the regional water balance was analyzed, whose deficits denote the overexploitation of the resource in upstream oases. Likewise, the society-nature relationship within the Ramsar site was analyzed, whose values and the objectives of the environmental flows achieve culture. Also, the scopes and recommendations derived from the Brisbane declaration of 2018, its linkage with the objectives of sustainable development and scenarios related to climate change associated with the report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021) were analyzed.

In conclusion, the investigation verified the anthropic alteration of the tributary flows to the Ramsar site is responsible for its socio-environmental degradation. On the other hand, the links with the regional climate, its variability, and its projections (climate change) represent one of the main challenges for conserving this protected area. In this way and as a proposal, the restoration options must involve environmental, economic, legal and social tools (framed within the recommendations for implementing environmental flows), allowing an adequate water consumption balance for societies and ecosystems in the region.

INDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
INDICE GENERAL.....	iii
INDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE TABLAS.....	xiv
Capítulo I.....	20
INTRODUCCION	20
MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL	20
OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO	25
Hipótesis de trabajo	26
ÁREA DE ESTUDIO	26
Aspectos geológicos y geomorfológicos	27
Aspectos climáticos e hidrológicos	28
Características de la biodiversidad	30
Características socioeconómicas	31
ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN	32
REFERENCIAS.....	33
Capítulo II	40
HABITANTES DEL SITIO RAMSAR: DESCENDIENTES DE LOS HUARPES	40
INTRODUCCIÓN	40
METODOLOGÍA	41
Los descendientes de los huarpes	42
Economía, uso del agua y su relación con los caudales ambientales	42
Esfuerzos locales e institucionales para la remediación del humedal	42
La cultura y la identidad asociada a las lagunas.....	42
<i>La identidad lagunera</i>	42
<i>Las emociones hacia el territorio</i>	43
<i>Expresiones musicales</i>	43
RESULTADOS.....	44
Los descendientes de los Huarpes.....	44
Economía, uso del agua y su relación con los caudales ambientales	46
Esfuerzos locales e institucionales para la remediación del humedal	48
<i>Los azudes</i>	48

<i>Las legislaciones</i>	50
<i>La conciencia ciudadana y la visibilización del problema</i>	51
La cultura y la identidad asociada a las lagunas.....	52
<i>La identidad “lagunera”</i>	52
<i>Las emociones hacia el territorio</i>	53
<i>Expresiones musicales</i>	57
CONCLUSIÓN	58
REFERENCIAS.....	59
Capítulo III	64
CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	64
INTRODUCCIÓN	64
METODOLOGÍA	65
Precipitación	66
Temperatura	67
Validación de metodologías usadas en la incorporación de datos faltantes	68
Detección de valores extremos y atípicos.....	68
Variabilidad anual y mensual	69
Aleatoriedad.....	71
Independencia	71
Homogeneidad	72
Tendencia	72
Caracterización climática temporal	74
Caracterización climática espacial.....	74
Índice termo-pluviométrico de Lang (1920)	75
Índice de aridez de Emmanuel De Martonne (1923)	76
Clasificación climática de Köppen - Geiger	76
Clasificación climática de Thornthwaite y Mather (1955).....	78
Clasificación bioclimática de Holdridge (1967)	80
RESULTADOS.....	82
Análisis exploratorio de datos	82
Detección de valores extremos y atípicos (<i>outliers</i>).....	84
Variabilidad anual y mensual media	84
Aleatoriedad, independencia, homogeneidad y tendencia.....	86
Caracterización climática temporal	89

Caracterización climática espacial.....	96
Límites climáticos basados en precipitación y temperatura.....	99
CONCLUSIÓN.....	111
REFERENCIAS.....	112
Capítulo IV.....	119
VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA.....	119
INTRODUCCIÓN.....	119
METODOLOGÍA.....	121
Análisis espectral.....	122
Anomalías.....	123
Índices climáticos.....	124
Análisis multitemporal del estado de la vegetación en el sitio Ramsar....	126
RESULTADOS.....	130
Análisis espectral.....	130
Anomalías.....	135
Índices climáticos.....	141
Análisis multitemporal del estado de la vegetación en el sitio Ramsar....	146
CONCLUSIÓN.....	154
REFERENCIAS.....	156
Capítulo V.....	164
CAUDALES AMBIENTALES.....	164
INTRODUCCIÓN.....	164
CONTEXTO HISTÓRICO Y CONCEPTUAL.....	165
METODOLOGÍA.....	167
Parámetros IHA.....	169
<i>Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales.....</i>	<i>169</i>
<i>Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas anuales.....</i>	<i>169</i>
El Índice de Caudal Base (BFI, <i>Base Flow Index</i>).....	170
<i>Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales.....</i>	<i>170</i>
<i>Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos.....</i>	<i>170</i>
Parámetros de EFC.....	170
<i>Caudales extremadamente bajos.....</i>	<i>171</i>
<i>Caudales bajos.....</i>	<i>171</i>
<i>Pulsos de caudal alto.....</i>	<i>171</i>
<i>Pequeñas inundaciones.....</i>	<i>171</i>

<i>Grandes inundaciones</i>	172
<i>Definiciones</i>	172
Índice de predictibilidad, constancia y contingencia de Colwell. Este índice de	172
Caudal ambiental como fracción de una medida de tendencia central....	172
Caudal ambiental ABF (<i>Aquatic Base Flow</i>).....	173
Método de Tennant o Montana (1976).....	173
Caudales ambientales asociados a una probabilidad.....	173
Método 7Q10.....	173
Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales	173
Método de Matthey.....	173
Método de Hoppe.....	174
Q ₉₅ – Método colombiano.....	174
Método del caudal de mantenimiento.....	174
Métodos que establecen un valor de caudal ambiental para cada mes del año.....	174
Método Utah – mínimo del Q mensual.....	174
Propuesta de modificación de la Ley 25688 de la República Argentina	175
Alteración de caudales producidos por el impacto de una represa.....	175
RESULTADOS.....	176
Parámetros IHA - Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales.	176
Parámetros IHA - Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	178
Parámetros IHA – Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	179
Parámetros IHA - Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	180
Parámetros de los componentes del caudal ambiental (EFC).....	181
<i>Caudales extremadamente bajos</i>	181
<i>Caudales bajos</i>	182
<i>Caudales altos</i>	182
Pequeñas inundaciones	183
Grandes inundaciones.....	183
Caudales ambientales (QA) de acuerdo con métodos hidrológicos	188
<i>Caudales ambientales como fracción de una medida de tendencia central</i>	188
Caudales ambientales asociados a una probabilidad.....	192

Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales	192
Métodos que establecen un valor de caudal ambiental para cada mes del año	196
Impactos de la instalación de la represa Los Caracoles sobre el río San Juan	198
DISCUSIÓN	202
CONCLUSIÓN	203
REFERENCIAS.....	205
Capítulo VI.....	209
PROPUESTA DE AJUSTE A LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAUDALES AMBIENTALES	209
INTRODUCCIÓN	209
METODOLOGÍA	211
Propuesta de ajuste para el cálculo de caudales ambientales	211
Aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS	214
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	216
CONCLUSIÓN	221
REFERENCIAS.....	222
Capítulo VII.....	224
ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO REGIONAL INCLUYENDO EL FACTOR ANTRÓPICO.....	224
INTRODUCCIÓN	224
METODOLOGÍA	227
RESULTADOS.....	227
CONCLUSIÓN	230
REFERENCIAS.....	231
Capítulo VIII.....	233
ANÁLISIS BASADO EN LA DECLARACIÓN DE BRISBANE (2018) Y EL INFORME DEL IPCC (2021) SOBRE LOS CAUDALES AMBIENTALES EN EL SITIO RAMSAR	233
INTRODUCCIÓN	233
METODOLOGÍA	236
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	237
La declaración de Brisbane y la Agenda de Acción Global (AAG) sobre caudales ambientales	237
La definición	237

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	238
Las recomendaciones prácticas sobre los caudales ambientales	240
Nexo de los caudales ambientales hallados con los escenarios de cambio climático dispuestos en el VI informe del IPCC (2021)	242
CONCLUSIÓN	251
REFERENCIAS.....	252
Capítulo IX.....	255
CONCLUSIONES	255

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Localización y ubicación del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero.....	27
Figura 1. 2. Modelo Digital de Elevación (MDE) del sitio Ramsar de estudio... 30	
Figura 2. 1. Ubicación de asentamientos y vías de comunicación en la zona circundante al sitio Ramsar de estudio.....	43
Figura 2. 2. División política departamental del sitio Ramsar.....	45
Figura 2. 3. Construcción de azud en la zona cercana a San Miguel.....	48
Figura 2. 4. Restauración de espacios mediante la construcción de azudes en la zona cercana a San Miguel.	49
Figura 2. 5. Manual educativo ambiental sobre el sitio Ramsar.	52
Figura 2. 6. Semblanzas de Guanacache, antiguos pobladores de la zona.....	53
Figura 2. 7. Portada del documental: “Huanacache, Retratos en el Desierto”. 54	
Figura 2. 8. Fotografía de Fidel Roig Matóns dibujando a un hombre que navega en una de las ahora extintas lagunas (noroeste del sitio Ramsar) sobre su balsa (a). Cuadro “Partiendo para la pesca”, carbonilla y óleo de Fidel R. Matóns (b).	55
Figura 3. 1. Flujograma de zonas fundamentales (Köppen – Geiger).	77
Figura 3. 2. Cuencas hidrográficas y delimitación del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero.....	83
Figura 3. 3. Índice de concentración de precipitación anual (<i>PCI</i> anual).	85
Figura 3. 4. Índice de concentración de precipitación mensual (<i>PCI</i> mensual).86	
Figura 3. 5. Temperaturas medias mensuales para las estaciones Mendoza Aero, San Juan Aero, San Luis Aero y San Rafael Aero. Período 1993 – 2014.	89
Figura 3. 6. Temperaturas medias mensuales (°C, línea continua) y RCVm (línea punteada) para las estaciones San Rafael Aero (A), San Luis Aero (B), Mendoza Aero (C) y San Juan Aero (D). Período 1993 – 2014.	90

Figura 3. 7. Temperaturas medias (T_{med} °C) y desviaciones estándar (σ_{med} °C) para las estaciones consideradas. Período 1993 – 2014.....	91
Figura 3. 8. Variabilidad térmica (RCVm %). Período 1993 – 2014.	91
Figura 3. 9. Precipitación media anual (mm) y desviación estándar media anual de estaciones (mm) agrupadas por conglomerados. Período 1993 – 2014.	92
Figura 3. 10. Precipitación anual media (mm) del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero, San Luis Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán.....	93
Figura 3. 11. Precipitación media mensual (mm) del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero, San Luis Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán.....	93
Figura 3. 12. Coeficiente de variación medio mensual (%) de precipitación del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero, San Luis Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán.....	94
Figura 3. 13. Variabilidad media anual de precipitación (%) por RCVm del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero, San Luis Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán.	94
Figura 3. 14. Climogramas del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero (A), San Luis Aero (B), Mendoza Aero (C) y Ñacuñán (D).	95
Figura 3. 15. Bandas isotérmicas medias. Período 1993 - 2014.....	97
Figura 3. 16. Bandas pluviométricas medias y conglomerados de estaciones de precipitación. Período 1993 - 2014.....	98
Figura 3. 17. Límites climáticos basados en temperatura y precipitación según el índice de Lang. Período 1993 – 2014.	100
Figura 3. 18. Límites climáticos basados en temperatura y precipitación según el índice de Emmanuel de Martonne. Período 1993 - 2014.....	101
Figura 3. 19. Clasificación climática basada en temperatura y precipitación según el método de Köppen. Período 1993 - 2014.....	102
Figura 3. 20. Clasificación climática basada en temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial según el método de Thornthwaite. Período 1993 - 2014.	103
Figura 3. 21. Clasificación de zonas de vida basada en biotemperatura y precipitación según el método de Holdridge. Período 1993 - 2014.....	104
Figura 3. 22. Temperatura media anual de Argentina a escala $\approx 1:25.000.000$. Período 1981 – 2010 (SMN, 2019).....	106
Figura 3. 23. Precipitación media anual de Argentina a escala $\approx 1:25.000.000$. Período 1981 – 2010 (SMN, 2019).....	107
Figura 3. 24. Temperatura media anual de Argentina a escala $\approx 1:8.000.000$ (Bianchi y Cravero, 2010).....	108

Figura 3. 25. Precipitación media anual de Argentina a escala $\approx 1:8.000.000..$	109
Figura 4. 1. Área de estudio y estaciones hidroclimáticas utilizadas.....	122
Figura 4. 2. Anomalías de la temperatura superficial del océano en la región Niño 3.4 (océano Pacífico ecuatorial) entre los años 2000 y 2020.....	123
Figura 4. 4. Diferencias entre caudales de verano (a) e invierno (b) del río Mendoza, entre la estación Guido (1413) y las descargas de caudales del Dique Potrerillos.....	129
Figura 4. 5. Diferencias entre caudales medios mensuales de invierno del río San Juan entre la estación San Juan km 101 (SJkm101 – serial 1211) y El Encón (1219).....	129
Figura 4. 6. Análisis espectral de temperatura media mensual para la estación Guido (1413). Periodograma (izquierda) y ondoleta (derecha).	130
Figura 4. 7. Análisis espectral de precipitación media mensual para la estación Guido (1413). Periodograma (izquierda) y ondoleta (derecha).	131
Figura 4. 8. Análisis espectral del caudal medio mensual para la estación Guido (1413). Periodograma (izquierda) y ondoleta (derecha).	132
Figura 4. 9. Periodogramas para los modos de variabilidad de ONI (1957 – 2019) y PDO (1957 – 2017).	133
Figura 4. 10. Variabilidad de anomalía de temperatura de superficie del Pacífico (región Niño 3.4) entre 1982 y 2022.....	133
Figura 4. 12. Anomalías de precipitación media anual (a) 1994 – 2019 y mensual (b) 1993 - 2019 de la estación Guido.	137
Figura 4. 13. Anomalías del caudal medio anual (a) 1994 – 2019 y mensual (b) 1993 - 2019 de la estación Guido (1413).	138
Figura 4. 14. Pendientes de regresión lineal para anomalías medias anuales de temperatura (a), precipitación (b) y caudales (c).	139
Figura 4. 15. Anomalías de caudal medio anual (a) 1992 – 2018 y mensual (b) 1991 - 2018 de la estación El Encón (1219).....	140
Figura 4. 16. Correlación cruzada entre el índice AAO y precipitación en Guido.	142
Figura 4. 17. Correlación cruzada entre el índice PDO y precipitación en Guido.	142
Figura 4. 18. Correlación cruzada entre el índice SOI y precipitación en Guido.	143
Figura 4. 19. Correlación cruzada entre el índice ENM y precipitación en Guido.	143
Figura 4. 20. Correlación cruzada entre el índice ONI y precipitación en Guido.	143

Figura 4. 21. Correlación cruzada entre el índice MEI y precipitación en Guido.	144
Figura 4. 22. Correlación cruzada entre el índice MJO y precipitación en Guido.	144
Figura 4. 23. Correlación cruzada entre el índice IOD y precipitación en Guido.	144
Figura 4. 25. Perfiles transversales de los diferentes Tau de NDVI (tendencia) para el sitio 1.	148
Figura 4. 26. Perfiles transversales de los diferentes Tau de NDVI (tendencia) para el sitio 2.	149
Figura 4. 27. Correlación (Pearson) de rasters multibanda entre Precipitación media estacional (Guido) y NDVI para los períodos: a) Inviernos 1985-1999, b) Veranos 1985-1999, c) Inviernos 2000-2019 y d) Veranos 2000-2019.	150
Figura 4. 28. Correlación (Pearson) de rasters multibanda entre el caudal medio estacional (Guido – 1413) y NDVI para los períodos: a) Inviernos 1985-1999, b) Veranos 1985-1999, c) Inviernos 2000-2019 y d) Veranos 2000-2019.	151
Figura 4. 29. Correlación (Pearson) de rasters multibanda entre el caudal medio estacional (El Encón – 1219) y NDVI para los períodos: a) Inviernos 1993-1999, b) Veranos 1991-1999, c) Inviernos 2003-2018 y d) Veranos 2001-2019.	152
Figura 4. 30. Índice topográfico de humedad en la zona de estudio.	153
Figura 4. 31. Imagen de Landsat/Copernicus (diciembre de 2019).	154
Figura 5. 1. Área de estudio y estaciones hidrométricas utilizadas.	168
Figura 5. 3. Sumatoria de promedios escurridos entre MEG+SJ1 (zona norte del sitio Ramsar) y MEG+SJ1+TVU para la totalidad de este.	177
Figura 5. 4. Cuantiles mínimos (a) y máximos (b) anuales para 1, 3, 7, 30, 90 días. Índice de flujo base (caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual) (c).	179
Figura 5. 5. Momento de ocurrencia (día juliano) de las condiciones hidrológicas extremas mínimas (a) y máximas (b) anuales.	179
Figura 5. 7. Magnitud (a) y duración (b) de caudales extremadamente bajos para diferentes percentiles de ocurrencia.	181
Figura 5. 8. Magnitud (a) y duración (b) de caudales bajos para diferentes percentiles de ocurrencia.	182
Figura 5. 9. Magnitud (a) y duración (b) de caudales altos para diferentes percentiles de ocurrencia.	182
Figura 5. 10. Magnitud (a) y duración (b) de pequeñas inundaciones para diferentes percentiles de ocurrencia.	183
Figura 5. 11. Magnitud (a) y duración (b) de grandes inundaciones para diferentes percentiles de ocurrencia.	183
Figura 5. 12. Componentes del caudal ecológico (IHA) para las estaciones MEG (a), SJ1 (b) y TVU (c). Para efectos comparativos visuales, la escala temporal de	

las series fue ajustada a la longitud disponible en TVU. (Formato fecha MM/DD/AAAA).	185
Figura 5. 13. Curva de duración de caudales diarios para las estaciones MEG (a), SJ1 (b) y TVU (c).	185
Figura 5. 14. Caudales medios y medianos anuales para las estaciones MEG, SJ1 y TVU.	186
Figura 5. 15. Duración de caudales bajos y altos por año para las estaciones MEG, SJ1 y TVU.	187
Figura 5. 16. Índices de predictibilidad P (a), constancia C (b) y contingencia M (c) de Colwell.	187
Figura 5. 17. Frecuencia anual promedio de $Q > 3*Q50$	188
Figura 5. 18. Caudales ambientales calculados como porcentajes fijos del caudal anual medio (10 %).	189
Figura 5. 19. Caudales ecológicos mínimos de acuerdo con el método utilizado por el Ministerio de Medio Ambiente de la República de Chile.	190
Figura 5. 20. Caudales ambientales calculados por el método de Tennant...	191
Figura 5. 21. Caudales ambientales de acuerdo con el método de 7Q10.	192
Figura 5. 22. Caudales ambientales calculados por el método de Matthey ...	192
Figura 5. 23. Caudales ambientales calculados por el método de Hoppe (Díez, 2000), categorías: caudal de limpieza Q17 (a, b), caudal de mantenimiento Q40 y caudal mínimo de hábitat Q80 (e, f).	193
Figura 5. 24. Caudales ambientales calculados por el método del Programa de recursos de las grandes llanuras septentrionales (NGPRP, Northern Great Plains Resources Program).	194
Figura 5. 25. Caudales ambientales calculados por el método del Q95 – Método colombiano	195
Figura 5. 26. Método del caudal de mantenimiento.	196
Figura 5. 28. Caudales ambientales calculados por el método Utah.	197
Figura 5. 29. Caudales ambientales por la metodología de reforma propuesta a la Ley 25688 de la República Argentina.	198
Figura 5. 30. Componentes del caudal ecológico (EFC) para la estación SJ1 (a) y SJ4 (b).	199
Figura 5. 31. Componentes del caudal ecológico (EFC) de la estación SJ1 (a) y SJ4 (b), en el período desde el 10 de octubre de 2008 al 30 de junio de 2019 (formato fecha MM/DD/AAAA).	200
Figura 5. 32. Titular del Diario de Cuyo (2013), reportando sobre la situación en la quebrada La Flecha (provincia de San Juan) el 7 de febrero de 2013.	201
Figura 6. 1. Mapa físico – político oficial de la Provincia de Mendoza.	211
Figura 6. 2. Longitudes (km) de canales de ríos aportantes al sitio Ramsar.	212

Figura 6. 3. Esquema de modificación propuesta a los caudales ambientales de origen hidrológico.....	213
Figura 6. 4. Áreas sobre cauces y franjas riparias de los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán.....	215
Figura 6. 5. Evapotranspiración potencial (caudal) sobre cauces y franjas riparias de los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán.	216
Figura 6. 6. Ajuste de los hidrogramas de Mendoza – Guido (MEG) (a), San Juan – km. 101 (SJ1) (b) y Tunuyán – Valle de Uco (TVU) (c) bajo la metodología del Caudal de Mantenimiento (Qmant).	218
Figura 6. 7. Ajuste de los hidrogramas de Mendoza – Guido (MEG) (a), San Juan – km. 101 (SJ1) (b) y Tunuyán – Valle de Uco (TVU) (c) bajo la metodología de la propuesta de modificación de la Ley argentina 25688 (L25688)..	219
Figura 6. 8. Ajuste de los hidrogramas de Mendoza – Guido (MEG) (a), San Juan – km. 101 (SJ1) (b) y Tunuyán – Valle de Uco (TVU) (c) bajo la metodología de la NGPRP (Programa de Recursos de las Grandes Llanuras Septentrionales).	220
Figura 7. 1. Analogía del balance hídrico sin intervención, intervenido y sustentable para el sitio Ramsar de estudio y sus zonas de oasis aguas arriba.	225
Figura 7. 2. Resultado del balance hídrico del río Mendoza. El eje Y está expresado en caudales (m ³ /s).....	226
Figura 7. 3. Oferta y demanda hídrica media anual para las cuencas de estudio.	228
Figura 7. 4. Oferta y demanda hídrica media mensual para las cuencas de estudio: a) río Mendoza; b) río San Juan; c) río Tunuyán.	229
Figura 8. 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (Agenda 2030).....	239
Figura 8. 2. Cambios térmicos en la superficie, relativos al período 1850 – 1900..	243
Figura 8. 3. Escenarios de incrementos de calentamiento global.	244
Figura 8. 4. Respuestas de la precipitación media anual (cambio en %) y la columna media anual de humedad de suelo (desviación estándar).....	245
Figura 8. 5. Cambio térmico de superficie global, relativo al período 1850 – 1900.	245
Figura 8. 6. Regiones consideradas dentro del análisis sectorial del IPCC. ..	246
Figura 8. 7. Cambios proyectados en temperatura media anual, precipitación media anual, precipitación máxima para cinco días y días consecutivos secos, con período relativo a 1850 – 1900 y basado en simulaciones usando escenarios SSP5 – 8.5.	247
Figura 8. 8. Pronósticos de cambios para las regiones SWS y SES.....	248

Figura 8. 9. Modelos CMIP6 sobre el pronóstico del cambio de la temperatura media (T °C) - Calentamiento 2°C con SSP5-8.5 (relativo al período 1850-1900) - Anual (34 modelos).....	249
Figura 8. 10. Los Humedales, un llamado a la acción.....	250

INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Localidades o asentamientos dentro del sitio Ramsar de acuerdo con diversas fechas de registro oficial y estimación.....	45
Tabla 3. 1. Clasificación de Lang	75
Tabla 3. 2. Clasificación de De Martonne.....	76
Tabla 3. 3. Tipos climáticos de acuerdo con índice global de humedad.	79
Tabla 3. 4. Subtipos climáticos aplicados para los climas C1, D y E.....	79
Tabla 3. 5. Eficiencia térmica de acuerdo con la ETP	80
Tabla 3. 6. Zonas de vida de Holdridge.....	81
Tabla 3. 7. Superficies de cuencas.	82
Tabla 3. 8. Resumen de pruebas aplicadas a precipitación. Período 1993 – 2014.	87
Tabla 3. 9. Resumen de pruebas aplicadas a temperatura. Período 1993 – 2014.	88
Tabla 3. 10. Valores medios de precipitación y temperatura, calculados a partir de isotermas medias (Figura 3.15) e isoyetas medias (Figura 3.16) para el período 1993 – 2014.	99
Tabla 4. 1. Estaciones hidroclimáticas.	121
Tabla 4. 2. Resumen de periodicidades máximas (años) asociados a los periodogramas de temperatura media mensual (Figura 4.6) de acuerdo con períodos de mayor energía y su vinculación con ventanas temporales de variabilidad climática	134
Tabla 4. 3. Resumen de periodicidades máximas (años) asociados a los periodogramas de precipitación media mensual (Figura 4.7) de acuerdo con períodos de mayor energía y su vinculación con ventanas temporales de variabilidad climática	134
Tabla 4. 4. Resumen de periodicidades máximas (años) asociados a los periodogramas de caudal medio mensual (Figura 4.8) de acuerdo con períodos de mayor energía y su vinculación con ventanas temporales de variabilidad climática.	135
Tabla 4. 5. Ventanas temporales de los índices climáticos utilizadas en este estudio.....	142
Tabla 5. 1. Estaciones hidrométricas consideradas.	168

Tabla 5. 2. Requerimientos de caudales de acuerdo con el método de Tennant	173
Tabla 5. 3. Requerimientos de caudales de acuerdo con el método de Hoppe	174
Tabla 5. 4. Cocientes entre los índices de Constancia (C) y Contingencia (M) versus Predictibilidad (P) de Colwell.	187
Tabla 6. 1. Características morfométricas utilizadas para la ejecución del modelo hidrológico.	215
Tabla 6. 2. Porcentajes de infiltración en cauces.	217
Tabla 6. 3. Diferencias porcentuales de volumen (área bajo la curva) entre la propuesta realizada ($I + E$) y los hidrogramas calculados bajo el Caudal de Mantenimiento.	218
Tabla 6. 4. Diferencias porcentuales de volumen (área bajo la curva) entre la propuesta realizada ($I + E$) y los hidrogramas calculados por la propuesta de modificación de la Ley 25688.	219
Tabla 6. 5. Diferencias porcentuales de volumen (área bajo la curva) entre la propuesta realizada ($I + E$) y los hidrogramas calculados bajo la metodología de la NGPRP.	220
Tabla 7. 1. Volúmenes anuales (hm^3) de demandas y oferta de agua para las cuencas de los ríos Mendoza, San Juan y Tunuyán.	228
Tabla 7. 2. Volúmenes (hm^3) derivados del balance hídrico (ecuación [7.1]) versus volúmenes de caudal ambiental obtenidos mediante la propuesta de Ley argentina N° 25688.	230

Capítulo I

INTRODUCCION

MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

Para abordar la problemática del uso excesivo de los recursos hídricos y el deterioro de los ecosistemas acuáticos, se utilizan los caudales ambientales como herramienta de la Gestión Integrada de los Recursos hídricos (Dyson et al., 2003). Actualmente, se reconocen a los caudales ambientales como esenciales para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, lo que ha sido mundialmente reconocido a través de la Conferencia de Brisbane, realizada en Australia en 2007 y actualizada en 2018 (Arthington et al., 2018). La aplicación de caudales ambientales requiere de un involucramiento social y un marco institucional y normativo, así como el uso de políticas claras y efectivas (UNESCO, 2014). Mediante la conferencia de Brisbane de 2018, los caudales ambientales se definen como:

“...cantidad, frecuencia, calidad y niveles de agua necesarios para sostener ecosistemas acuáticos, los cuales a su vez sustentan culturas, economías, formas de vida sustentables y bienestar social”.

El concepto representa (hasta la fecha) el último consenso mundial en el tema, sin embargo, la problemática de las demandas hídricas ambientales tiene décadas de debate. Tharme (2003) explica que el reconocimiento en las alteraciones hidrológicas de los ríos y cuerpos de agua a escala global, resultante en la degradación del ambiente, dan paso a una ciencia relacionada al estudio de los caudales ambientales, término relacionado a la cantidad y calidad de agua requerido para la conservación del ecosistema y que mejor imite el régimen de caudales naturales (CHD, 2007).

Durante la conferencia de Brisbane de 2018, fue propuesto que el término fuese cambiado por “agua ambiental” (basado en el trabajo de Horne et al., 2017), el cual incluiría también al recurso hídrico en régimen léntico. Sin embargo, para mantener la convencionalidad del término “caudales ambientales”, se decidió por consenso mantener su vigencia (Arthington et al., 2018).

Poff (2014) explica que la ciencia que yace bajo el término de caudales ambientales está basada en la cuantificación de los nexos entre los procesos hidrológicos y los componentes de variables ecológicas. En este sentido, las relaciones parten desde el punto de vista ecohidrológico (Dunbar y Acreman, 2001; Acreman, 2016) a la implementación de sus objetivos sobre la base de un componente socioambiental, incluyendo aspectos como la cultura, pueblos ancestrales y justicia social (Wantzen et al., 2016).

Los objetivos que han llevado a la preocupación por los caudales ambientales radican en el rápido deterioro de ecosistemas hidro-dependientes (p. ej., lagos, lagunas, franjas riparias o humedales), cuya vulnerabilidad sea aumentada por

regulaciones de origen humano (Rolls y Bond, 2017). Estos autores enfatizan en la importancia de entender los cambios en los regímenes fluviales (inducidos por origen natural o humano), con el fin de garantizar la planificación, implementación, entrega y monitoreo de los caudales ambientales.

Históricamente, la consideración y posible aplicación de caudales ambientales ha estado vinculada al manejo y uso de los recursos hídricos en una región. De esta forma, bajo presencia de represas, sistemas de riego y usos intensivos de agua, la urgencia de aplicación de estos caudales cobra mayor importancia (Richter y Thomas, 2007). Sin embargo, aun sin impactos antrópicos notables, el consenso científico apoya la idea de que todo sistema fluvial debería tener un plan de manejo, el cual incluya a los caudales ambientales (Arthington et al., 2018).

Es común que los caudales ambientales se identifiquen cuando el impacto humano es notorio. En este sentido, estos caudales se estarían utilizando como herramienta para restaurar y mitigar daños, antes que promover su protección pre-impactos (Poff, 2014). Cuando los regímenes fluviales o lacustres naturales son intervenidos, las alteraciones implican una disminución en los torrentes de agua. Los pulsos extraordinarios, el suministro de sedimentos finos y gruesos, la pérdida de biodiversidad y el impacto humano local son igualmente importantes (Tharme, 1996).

Uno de los principales elementos antrópicos de alto impacto en los caudales ambientales es originado por las represas. Desde la *U.S. Geological Survey* (USGS) y desde hace más de dos décadas, científicos que estudian los sistemas acuáticos han analizado los efectos de las represas sobre la geometría de canales y la vegetación. El conocimiento sobre la estrecha relación entre estas obras y los caudales, sedimentos y vegetación proporciona una herramienta para el manejo planificado de descargas, el cual puede potencialmente remediar daños previos (Dong, 2014). De esta forma, a través de herramientas de protección, restauración y mitigación provistas por los caudales ambientales, los ecosistemas podrían restituir sus múltiples servicios ecosistémicos, entre los que se incluyen: aprovisionamiento de alimentos y agua, regulación y control de inundaciones, servicios culturales y recreacionales y servicios de mantenimiento de ciclos naturales (p. ej., agua y nutrientes) (Bussettini, 2018).

Si bien la declaración de Brisbane (2018) otorga un marco de recomendación académico (no legal) sobre los caudales ambientales, cada Estado puede generar sus propios mecanismos regulatorios, basados en experiencias previas, características climáticas particulares, estado de los recursos hídricos, vulnerabilidad de ecosistemas y nivel y tipo de aprovechamiento de agua. En este sentido, cada país establece reglamentos específicos para la protección y establecimiento de los caudales ambientales.

Asimismo, si bien desde la declaración de Brisbane de 2007 se recomendó el uso del término *caudales ambientales*, en algunas regiones y desde hace décadas, el término ha sido denominado *caudal ecológico* (Arthington et al., 2018), vinculado a:

“...establecer la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad”.

La diferencia principal de este concepto (2007), versus el establecido en Brisbane en 2018, radica en que el primero tiene una orientación de objetivos estrictamente ecológicos, cuyos beneficios secundarios alcanzarían a la sociedad. En cuanto al segundo concepto, el término “ambiental” involucra como objetivo de estos caudales a los espacios naturales y la sociedad, constituyendo así un concepto más incluyente e integrador.

Jurídicamente para la Argentina y en el marco del Seminario Internacional de Cambio Climático, Política Fiscal Ambiental y Caudales Ambientales (COHIFE, 2015), se estableció el significado del Artículo 1° de la Ley N° 26.688 del Régimen de Gestión Ambiental de Aguas, insistiendo en que el caudal ambiental “es aquel concertado o regulado en una clausura a los fines de garantizar la existencia del río como tal”. Por su parte, la Asociación de Inspecciones de Cauce (ASIC, s/f) establece que para Mendoza, San Luis y San Juan, las legislaciones provinciales a las aguas no consideran tópicos tales como los servicios ecológicos, las necesidades de conservación de los ecosistemas (caudales ecológicos) y principios que satisfagan los requerimientos de las transformaciones estratégicas del siglo XXI.

La importancia en la determinación y consideración de los caudales ambientales radica en establecer criterios de planificación y gestión integral del recurso hídrico, a través de una serie de metodologías creadas según las características hidrológicas, hidráulicas y biológicas de cada región (Lozano et al., 2011; Del Pilar y Corradine, 2014). En este sentido y de acuerdo con Kucharsky (2018), los métodos hidrológicos se calculan a partir de información derivada de información de aforos, sobre cuyas curvas de duración de caudales se generan índices. Por su parte, los métodos hidráulicos tienen basamento sobre la relación entre los caudales y las características hidráulicas del canal o cauce. Finalmente, los métodos biológicos o de simulación de hábitat se basan en las necesidades hídricas de los ecosistemas o una especie en particular, los cuales, junto a información hidráulica, permitirían simular el entorno físico de diversas especies, obteniendo una cuantificación del hábitat disponible.

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 2003) expone que *“la ausencia de estudios de caudales ambientales pone en verdadero riesgo la existencia de ecosistemas, personas y economías”.* Esta situación puede ser aún más severa si una zona como el centro – oeste argentino, específicamente el humedal de las lagunas de Guanacache, posee un clima árido, lo cual la hace propensa a recurrentes y severas sequías que pueden poner en riesgo el equilibrio hídrico y ecológico del humedal y la región (Sosa et al., 1999; Sosa, 2012).

En vista de los riesgos que supone la vulnerabilidad de algunos ecosistemas (principalmente humedales), en 1971 se firmó en Ramsar (Irán) una convención sobre los humedales (Ramsar, 2014), cuyo objetivo se basa en la

“...conservación y uso racional de los humedales mediante acciones locales, nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo”.

Con la Declaración de Brisbane (2007) se incrementaron los trabajos y consensos alrededor de la importancia de los caudales ambientales sobre el mantenimiento y conservación de los regímenes hídricos naturales. De esta forma y con los años, la ciencia de los caudales ambientales se ha robustecido en trabajos específicos sobre el terreno (Poff et al., 2017) y a diferentes escalas de trabajo (King y Brown, 2010; O’Brien et al., 2017). Asimismo, el concepto ha cobrado importancia en estudios de países desarrollados y en vías de desarrollo (Kennen et al., 2018), con esfuerzos para promover el manejo desde la gobernanza y la transdisciplinariedad entre grupos científicos y sociedad (Pahl-Wostl et al., 2013; Conallin et al., 2017).

De igual forma y desde organismos y convenciones de acción global y regional (p. ej., IUCN, 2012; Ramsar 2015; European Commission, 2015), los caudales ambientales se han incorporado como un elemento que llama a su instauración y a los beneficios que produciría sobre ecosistemas degradados o susceptibles (p. ej., humedales). Bajo este concepto (donde la convención Ramsar toma un papel fundamental), varios trabajos importantes han sido publicados para visibilizar los retos dentro del manejo y protección de espacios acuáticos susceptibles (p. ej., Arthington, 2012; Horne et al., 2017b; Kennen et al., 2018).

Dentro de los humedales Ramsar, Barchiesi et al. (2018) llaman a la implementación y divulgación de los caudales ambientales como agentes de beneficios para la sociedad y ecosistemas de humedales y riparios. De esta forma, establece recomendaciones y acciones enmarcadas dentro de los Objetivos del Desarrollo Sustentable y hace divulgación sobre diferentes casos de estudio alrededor del mundo (sobre todo en ambientes amenazados o regulados por represas), como la cuenca del Murray-Darling (Australia), el río Yangtzé (China), el río San Pedro Mezquital (México) o el río Mara (entre Kenia y Tanzania).

Dentro de las acciones que Ramsar recomienda a los tomadores de decisiones (públicos y privados), se destacan:

- Consideración de establecimiento de objetivos ambientales definidos (específicos, medibles, realizables, relevantes y con tiempos acotados).
- Consideración de establecimiento de estándares de extracciones de agua.
- Consideración de estrategias basadas en escalas ajustadas a la cuenca hidrográfica.
- Consideración de evaluación de los caudales ambientales para determinar requerimientos hídricos de diversos fines.
- Consideración de un diálogo multidisciplinario para la planificación sistemática de los caudales ambientales.

- Consideración de entendimiento y trabajo mancomunado con ejecutantes y administradores de represas.
- Consideración de involucramiento de la sociedad multinivel (incluidas comunidades locales e indígenas) para las tomas de decisión estratégicas.

Bajo mención de las represas, la Declaración de Brisbane de 2018 es clara acerca del incremento en la construcción de estas obras civiles, sobre todo erigidas sobre ambientes sensibles (p. ej., zonas áridas y con población con elevadas demandas de agua). En este sentido explica que mundialmente cerca de un 50 % de los volúmenes de los ríos están comprometidos bajo regulación en represas, alterando y estresando hídricamente los espacios y ecosistemas aguas abajo (Nikitina et al., 2020).

Más allá de espacios naturales, la alteración de flujos hídricos, sumado a las crecientes incertidumbres asociadas a la variabilidad hidroclimática (Poff, 2018) y al cambio climático en sí (IPCC, 2021), los caudales ambientales han tomado relevancia como elemento importante para el mantenimiento y restauración de espacios habitados, principalmente por población nativa o indígena. En este sentido, el bienestar común y las oportunidades van de la mano con la preservación de las culturas y las formas de vida que usualmente están ligadas a ambientes acuáticos como humedales (Lokgariwar et al., 2013; Jackson, 2017).

La convención Ramsar (de la cual Argentina es parte con más de 20 sitios) insta a las partes contratantes a impedir las progresivas degradaciones de los humedales (Ramsar, 2014). Por otra parte, en las Conferencias de las Partes (COP10 y COP11) de Naciones Unidas sobre el cambio climático, se reafirmó el compromiso de evitar los impactos negativos en las características ecológicas de los sitios Ramsar como primer paso de las estrategias para impedir la pérdida de estos (Ramsar, 2015a,b,c,d). Mediante sus cuatro objetivos, en su Plan Estratégico de Ramsar para 2016- 2024 se insta a: (i) hacer frente a los factores que impulsan la pérdida y degradación de los humedales, (ii) llevar a cabo una conservación y un manejo eficaces de la red de sitios Ramsar, (iii) realizar un uso racional de todos los humedales y (iv) mejorar la aplicación de los objetivos en función de las necesidades de cada país (Ramsar, 2016).

Con el establecimiento del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero, los antiguos humedales cuyanos del centro-occidente argentino se protegieron legalmente (bajo amparo de la Ley argentina N.º 23919), con fecha de designación del 14 de diciembre de 1999. Este sitio cuenta actualmente con 9.623,70 km² y abarca una zona tectónica deprimida, rellena de antiguos sedimentos provenientes de las escorrentías de los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán (Ramsar, 2007).

El sitio Ramsar, objeto de estudio de esta investigación, incluye un largo sistema de lagunas y humedales encadenados, cuyas características lo hacen objeto de un valioso nicho de biodiversidad (Ramsar, 2007). Asimismo, por tratarse de humedales en una zona árida, representó el sitio de asiento del antiguo pueblo

indígena Huarpe (hoy desaparecido), cuyos descendientes (cerca de 6.000 habitantes) aún viven en sus márgenes (Sosa, et al., 1999; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2017).

Sosa (2012) explica que el objetivo de creación de este sitio Ramsar fue proteger la biodiversidad de los ecosistemas, asociados a los humedales de esta zona árida. De esta forma, la región estaría protegida legalmente de cualquier intervención. Sin embargo, luego de la conquista española y con el paso del tiempo, aguas arriba fueron creándose oasis irrigados (p. ej., San Juan, Mendoza y Tunuyán), cuyas demandas llegan a utilizar la mayor parte de la oferta hídrica de escorrentía disponible. Lo anterior implica que los ríos no fluyen hacia el sitio Ramsar, por lo que la degradación de este no proviene de su interior, sino del exterior.

Corona y González (2014) ejemplifican por medio de imágenes satelitales la evolución del humedal de Guanacache durante el período 1989-2013, observándose el deterioro del sitio Ramsar comparándolo con el conocido desastre ambiental del mar de Aral (Asia). Si bien los diferentes investigadores evidencian los graves problemas ambientales de este sitio Ramsar y sus consecuencias ecológicas y sociales, es notable que ninguno hace mención directa al estudio del caudal ambiental como eslabón principal para el entendimiento de esta situación.

La problemática entonces parte desde el uso eficiente de los recursos hídricos. De esta forma, aún con condiciones áridas y semiáridas en la región, las actividades socioeconómicas en los oasis podrían continuar, permitiendo que los ríos sigan fluyendo (caudales ambientales) hacia los humedales bajos. La recuperación de los humedales (objetivos de la convención de Ramsar) está en función de la instauración de los caudales ambientales, cuyos objetivos lograrían tener un equilibrio entre la oferta y demanda de agua en la zona, el cual sea beneficioso para el binomio sociedad-naturaleza regional.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO

El objetivo general de la investigación es *analizar los caudales ambientales en el sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero, haciendo énfasis en la relación sociedad-naturaleza que se vincula con los oasis irrigados de Mendoza, San Juan y Tunuyán*. Los objetivos específicos se detallan a continuación:

-Observar los vínculos de la relación sociedad – naturaleza dentro del ámbito del sitio Ramsar, basados en descripciones de tópicos locales, como población, cultura, economía, uso del agua, relación con caudales ambientales e identidades culturales, sensitivas y emocionales.

-Examinar las condiciones climáticas imperantes en la región de estudio, mediante análisis temporales y espaciales de la precipitación y temperatura.

- Analizar la variabilidad hidroclimática regional del sitio Ramsar, haciendo especial énfasis en los caudales aportantes desde la cordillera de los Andes y afluentes al área de estudio.
- Determinar los caudales ambientales que deben fluir al humedal para restaurar y mantener las condiciones ecológicas y sociales relacionadas, cuya metodología se enmarca en el análisis por medio de métodos hidrológicos.
- Proponer un ajuste a las metodologías de caudales ambientales que se utilizan actualmente, lo cual permita incluir las pérdidas de agua en el cauce (derivadas de infiltración y evapotranspiración) para trayectos extensos entre la fuente y la zona objetivo.
- Estudiar el balance hídrico regional en términos de las demandas ambientales, permitiendo el establecimiento del estado de la oferta y demanda de los recursos hídricos en la zona, así como también la observación de los posibles escenarios futuros y de remediación de acuerdo con los objetivos para el establecimiento de los caudales ambientales.
- Analizar la situación actual y prospectiva del sitio Ramsar de estudio, teniendo como base a la Declaración de Brisbane (2018) y el VI informe del IPCC (2021), haciendo énfasis sobre la contribución de los humedales sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Agenda 2030).

Hipótesis de trabajo

Las actividades socioeconómicas y el uso ineficiente del agua en los oasis irrigados (Mendoza, San Juan y Tunuyán), representan la principal causa de degradación socioambiental del humedal y sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero.

ÁREA DE ESTUDIO

La investigación está enfocada sobre el sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Se localiza entre los paralelos 34°06' S y 32°00' S y los meridianos 68°42' O y 66°24' O, ubicado en el centro-oeste de la República Argentina, específicamente entre las provincias de Mendoza, San Juan y San Luis (Figura 1.1).

El polígono del sitio Ramsar fue creado en común acuerdo entre las provincias de Mendoza y San Juan en 1999 (año de inclusión a la lista de Humedales de Importancia Internacional de la Convención de Ramsar) (Sosa y Vallvé, 1999). Posterior al año 2000, se incorporó una porción al este y sur, con espacios de la provincia de San Luis. Para el 2007, la extensión del sitio se amplió a su valor definitivo actual, alcanzando los 9.623,70 km² (Sosa, 2007; Sosa 2012).

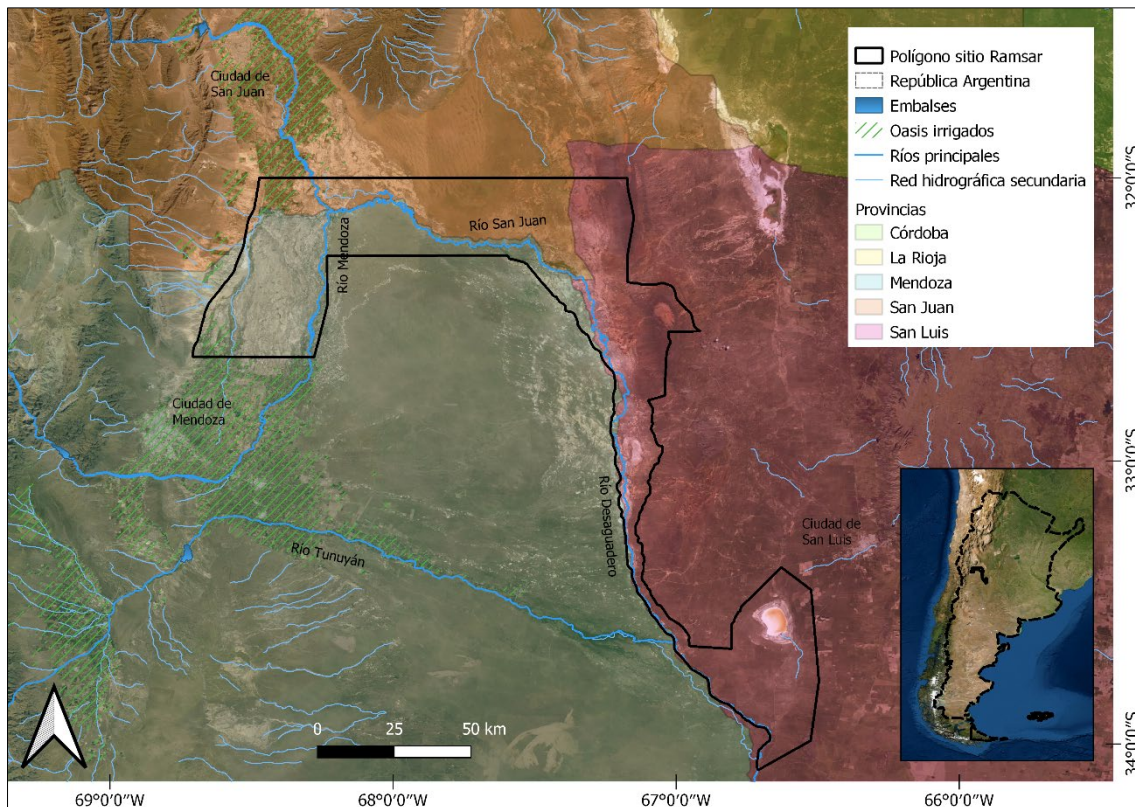


Figura 1. 1. Localización y ubicación del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero.

Si bien el sitio Ramsar es la zona objeto de estudio, las interacciones con la región de Cuyo circundante establecen las conexiones ambientales (p. ej., aspectos geológicos, climáticos, hidrológicos, biodiversidad) y socioeconómicas existentes.

Aspectos geológicos y geomorfológicos

Moreiras y Devincenzi (2015) expresan que la región está afectada por esfuerzos de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, con resultado en el levantamiento de la cordillera andina (hace 200 millones de años [Ma]). El sistema de esfuerzos atemporal dio origen a la cordillera de los Andes en diferentes etapas (Cordillera Principal hace 20 Ma; Cordillera Frontal entre 8 y 12 Ma; Precordillera hace 7 Ma). En la región afloran unidades litoestratigráficas asociadas a basamentos cristalinos, sedimentos cretácicos y depósitos cuaternarios, destacando la formación Arco del Desaguadero, cuya secuencia estratigráfica presenta altos porcentajes de arena derivados de un régimen fluvial (Costa et al. 2001, citado por Moreiras y Devincenzi, 2015). Estos depósitos se ubican en niveles fluviales aterrazados en márgenes de ríos como Mendoza, Zonda y Tunuyán. Por su parte, los abanicos aluviales coalescentes se extienden desde el piedemonte occidental hasta las márgenes del río Desaguadero (este). En la zona de humedales, se encuentran sedimentos lacustres en sitios de

márgenes y confluencia de ríos, representando depósitos aluviales y eólicos a lo largo de la llanura de inundación del río Desaguadero, con predominancia de sedimentos limo-arcillosos (Moreiras y Devincenzi, 2015).

En cuanto a la geomorfología, las formas se vinculan a los esfuerzos tectónicos hacia el oeste (mayores elevaciones y pendientes), dejando grandes planicies aluviales al este, con desarrollo de ambientes lacustres de pendiente bajas. De esta forma, las zonas más bajas o deprimidas (al este, menores a 600 msnm) representan los sitios de acumulación de sedimentos y de desarrollos lacustres y de humedales (Figura 1.2). Los materiales de estas planicies son del tipo aluvial, transportados por las escorrentías, cuyos espesores alcanzan hasta los 1000 m en el centro de la cuenca (Moreiras y Devincenzi, 2015).

Relacionado a los procesos, el sistema está representado por elementos de tipo fluvial (sedimentación por escorrentías), lacustre (determinado por la presencia de lagunas y humedales encadenados) y eólico. Dentro del sistema fluvial, se reconocen segmentos de acuerdo con su dinámica geomorfológica: septentrional (lagunas y bañados de poca profundidad), medio (alrededor de los 33° S, representado por el encauzamiento del río Desaguadero) y el sector meridional, con salitrales y remanentes de agua que dan paso al río Salado (Moreiras y Devincenzi, 2015).

Sobre el segmento medio del río Desaguadero, el perfil del río presenta evidencias de erosión retrocedente, dando origen al desarrollo de cárcavas. Este proceso podría haberse ampliado debido a la desertificación y desecamiento de las lagunas aguas arriba, lo cual a su vez potencia el drenaje de toda la zona (Moreiras y Devincenzi, 2015). Las características geológicas y paleolacustres evidencian la existencia pasada de vastos humedales en el entorno del río Desaguadero, cuya extensión de agua (superior a la actual) rebasaba los bancos de sedimentos, permitiendo el desarrollo lacustre (Chiavazza y Prieto, 2008).

Aspectos climáticos e hidrológicos

La región cuyana, característica de climas áridos y semiáridos, es concordante con la diagonal árida sudamericana, que se encuentra desde la costa árida del Perú hasta la Patagonia argentina (Bruniard, 1982; Lauro, 2016; Albiol, 2018). Las características áridas de la zona se generan principalmente debido al efecto orográfico de los Andes, el cual actúa como una barrera natural de los vientos del oeste, ocasionando que los mismos produzcan precipitaciones en la vertiente pacífica, dejando a la vertiente atlántica andina desprovista de lluvias abundantes (Capitanelli, 1967; Bruniard, 1982; Albiol, 2014).

La mayor parte de las escasas precipitaciones de la región decrecen de este a oeste, presentando mínimos valores cerca de los Andes. Por otro lado, el efecto cordillerano se conjuga con la cercanía al Pacífico, jugando un papel importante en el clima de alta montaña, con las intensas nevadas del invierno y por la ocurrencia del viento Zonda (Föhn) en la vertiente de sotavento de los Andes (Bruniard, 1982; Albiol, 2014).

La mayor parte de las precipitaciones ocurren durante el verano, producidas principalmente por frentes fríos y líneas de inestabilidad, presentando una menor frecuencia de sistemas de origen orográfico. La precipitación anual media alcanza los 221 mm (Albiol, 2014; Albiol, 2018). Por su parte, las temperaturas son propias de una región continental del hemisferio Sur, presentando máximas en enero y mínimas en julio. Estas tienden a ser menores conforme se aumenta en altitud y latitud, generando un gradiente negativo de norte a sur y de este a oeste (Lauro, 2016).

De acuerdo con tipos climáticos, Norte (1996) expresa que la mayor parte del área está dominada por un clima desértico de tipo B (Köppen). Asimismo, el autor señala que las zonas del noreste mendocino (y sureste sanjuanino), reciben menores precipitaciones en el año y con mayor frecuencia en verano. También destaca que la zona de mayor precipitación corresponde al extremo oeste, ubicándose sobre alta montaña y en forma de nieve, durante el invierno. En todo caso, Albiol (2018) reitera que la región posee déficit pluviométrico permanente y elevadas amplitudes térmicas anuales.

En cuanto a la hidrología de la región, Torres (2015) ubica la zona dentro del sistema del río Desaguadero (Desaguadero-Salado-Chadileuvú-Curacó-Colorado), el cual abarca más de 360.000 km² de superficie, con desembocadura en el océano Atlántico. Dado el hundimiento tectónico de la zona de Guanacache (entre las provincias de Mendoza, San Juan y San Luis), el río conforma su primer nodo de regulación natural, formando el espacio de lagunas y humedales.

Torres (2015) señala que el área de las Lagunas de Guanacache y el Desaguadero recibe escasos o nulos caudales de sus afluentes (principalmente escorrentías desde los Andes), por lo que el problema de desecación se vincula a procesos internos y externos. En este sentido, plantea las consecuencias de tres sucesos en la zona: a) cambio de clima, variando hacia un ambiente más árido; b) uso cada vez más intensivo de las aguas en las cuencas medias de los afluentes, con construcción de represas y aprovechamientos intensivos y consuntivos de agua (p. ej., irrigación e industria); c) erosión retrocedente del río, profundizando los cauces y disminuyendo el nivel de base del sistema, lo cual acelera el proceso de desecación de los humedales.

Relacionado al período post-impacto de los sucesos mencionados, Torres (2015) expone que *“...el caudal es menor y más uniforme, perdiéndose el efecto que producían las periódicas crecidas del río, que cumplían una acción benéfica para el sector del río...”*. De esta forma y en 2015, a la zona sólo ingresaban pequeños caudales provenientes del río San Juan, con esporádicos y pequeños remanentes desde el río Mendoza.

Si bien este autor reitera la imposibilidad de modificar el clima regional y la inviabilidad de cambiar el esquema económico en los oasis, expresa que una de las acciones más importantes debe orientarse a la disminución de la erosión retrocedente. De esta forma e inicialmente, algunas zonas pueden recuperarse mediante la construcción de azudes, los cuales permitan disminuir las tasas de

erosión, retrasar el vaciamiento de lagunas y humedales y restituir el nivel de base del río.

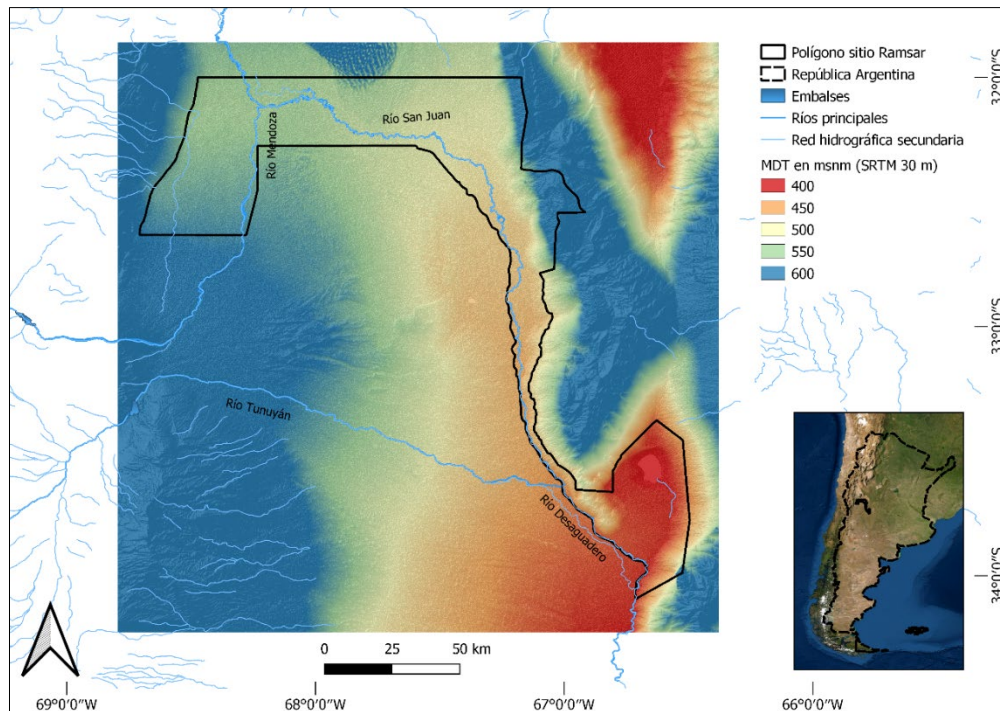


Figura 1. 2. Modelo Digital de Elevación (MDE) del sitio Ramsar de estudio. Fuente MDE: Farr et al. (2007).

De acuerdo con el Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2016), el río Desaguadero se forma luego de la sección de humedales al noreste del sitio Ramsar, denominando río San Juan a la sección producto de la confluencia de éste con el Mendoza. Por su parte, otros autores clásicos como Gez (1938), denominan río Desaguadero al cauce formado a partir de la confluencia del San Juan y el Mendoza. Por convencionalidad y actualidad respecto al ente rector de la geografía nacional, en este trabajo se siguieron las pautas del IGN.

Características de la biodiversidad

Dadas las características áridas de la región y la disposición geológica y geomorfológica, las escorrentías y sedimentos se depositaron durante miles de años en las zonas más bajas (Figura 1.2). De esta forma, los extensos humedales y lagunas encadenadas se conformaron en oasis naturales del desierto. Sosa y Candia (2015) describen que la región se encuentra dentro de la provincia fitogeográfica de Monte, compuesta por estepas arbustivas, incluyendo bosques abiertos (no densos) que alcanzan los 20.000 km². Asimismo, hay comunidades halófitas extensas, vinculadas a las cuencas endorreicas, antiguos fondos lacustres y márgenes del Desaguadero.

Dentro de la caracterización florística, se identificaron 7 familias y 25 especies de plantas, cuyos porcentajes de cobertura en importancia se asocian al monte

(54 %), arbustal halófilo (40 %), salitral (29 %) y vegetación de cárcavas (23,4 %) (Sosa y Candia, 2015).

En cuanto al componente de fauna, el área pertenece a la región zoogeográfica de Monte, con presencia significativa de roedores, marsupiales, armadillos y felinos (gato montés, gato del pajonal, gato moro y puma con color). Dentro del grupo de roedores, destaca el coipo, conocido como “nutria” por lugareños, el cual tiene como hábitat los espacios acuáticos de humedales (Sosa y Candia, 2015). Dentro de la fauna de mayor tamaño destaca el guanaco y el pecarí. Del grupo de las aves se encuentran el ñandú, perdices y martineta, así como carroñeros como el cóndor y también aves carnívoras, como aguiluchos y halcones (Sosa y Candia, 2015).

Las aves acuáticas representan uno de los principales grupos objetivos de conservación, de los cuales fueron relevadas 23 especies, con 22.000 individuos para 1999 y 10.000 para 2007, entre los que destacan el flamenco común, anátidos y rálidos (Sosa y Candia, 2015).

Además de otros grupos faunísticos (como vertebrados inferiores, reptiles y ofidios), destacan además la ictiofauna asociada a los espacios lacustres y humedales. De este grupo, la zona pertenece a la región ictiográfica Sub-andina cuyana, con ejemplares (en lagunas remanentes) como la mojarra nativa y la anguila de río o bagre otuno. En total, se contabilizaron 8 especies de peces, que, aunque no están en peligro de extinción, representan parte del patrimonio natural de la región (Sosa y Candia, 2015).

La riqueza biológica de la zona representó un soporte para elevar la región a sitio Ramsar de protección internacional. De esta forma, esta organización contabilizó 50 especies de aves acuáticas, cuyos espacios son amenazados por la influencia humana (Ramsar, 2007).

Características socioeconómicas

De acuerdo con Wetlands International LAC (2014) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022), dentro de los límites del sitio Ramsar habitan cerca de 2.000 personas (Blanc, [s/f] establece un máximo de 4.000 habitantes), repartidas principalmente entre 12 comunidades. Buena parte de esta población es descendiente del pueblo Huarpe, que habitó la zona de humedales, bañados y lagunas siglos atrás.

La ubicación de los asentamientos actuales está atada a su historia remota y reciente, cuyas ubicaciones responden a márgenes de rutas provinciales o nacionales, vías de ferrocarriles o cauces fluviales. La baja densidad de población para un territorio de casi 10.000 km² genera un problema significativo de apropiación del territorio.

En cuanto a características económicas, ancestralmente los pueblos huarpes se vinculaban a las actividades lacustres. Con su desaparición o declive, los descendientes se dedican principalmente a actividades como la ganadería

(principalmente caprina), pastoreo comunitario (rebaños compartidos entre puesteros), agricultura (con cultivos de ciclo corto en suelos lacustres) y actividades manufactureras a partir de gramíneas (fabricación de escobas y cesterías) (Aquabook, 2016).

Con la desecación de las lagunas y la pérdida de oportunidades, la emigración hizo caer la población local, disminuyendo así el potencial económico y de desarrollo. Las personas que siguen en el lugar optan por la ganadería extensiva (principalmente caprina) y sobre lugares donde aún pueden conseguir pasto y agua (OCHA, 2021).

ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

La tesis incluye nueve capítulos, de los cuales uno es introductorio y otro donde se resumen las conclusiones generales (final). En las conclusiones, se vincula el contexto hidroclimático y socioeconómico junto a los caudales ambientales, cuyos objetivos se enmarcan en el plan regulatorio de la Declaración de Brisbane (2018), con el fin de restaurar, proteger y mantener sus beneficios sobre el sitio Ramsar de estudio y sus poblaciones. A continuación, se describen las temáticas de los restantes siete capítulos.

En el **Capítulo II** (Habitantes del sitio Ramsar: descendientes de los Huarpes), se presentan los análisis basados en descripciones de tópicos locales, como población, cultura, economía, uso del agua, relación con caudales ambientales e identidades culturales, sensitivas y emocionales.

En el **Capítulo III** (Caracterización climática) se identificaron las condiciones climáticas imperantes en la región de estudio, mediante análisis temporales y espaciales de la precipitación y temperatura media. Mediante la metodología utilizada, se pretendió comprobar los supuestos estadísticos subyacentes de las series temporales empleadas, establecer el régimen climático de acuerdo con la precipitación y temperatura y finalmente categorizar los tipos de clima que se presentan espacialmente en la zona de estudio.

Referente al **Capítulo IV** (Variabilidad hidroclimática), el objetivo de estudio se centró en analizar la variabilidad hidroclimática regional del sitio Ramsar, haciendo especial énfasis en los caudales aportantes desde la cordillera de los Andes. De esta manera, se estableció un detalle de las condiciones naturales recientes de variables como precipitación, temperatura y caudales relativos de la zona de estudio.

El objetivo principal del **Capítulo V** (Caudales ambientales) fue analizar los caudales ambientales que deben fluir al humedal para restaurar y mantener las condiciones ecológicas y sociales relacionadas. La metodología se orientó hacia el desarrollo del cálculo y análisis de caudales ambientales por medio de metodologías hidrológicas (p. ej., utilizando registros históricos de caudales).

En el **Capítulo VI** (Propuesta de ajuste a las metodologías de caudales ambientales), la investigación se basó en proponer un ajuste a las metodologías

de caudales ambientales, la cual permite incluir las pérdidas en cauce (derivadas de infiltración y evapotranspiración). Dicho ajuste permitiría sobreestimar los cálculos aguas arriba, con el fin de que a lo largo de los trayectos de los ríos hasta el sitio Ramsar, las pérdidas naturales por infiltración y evaporación no afecten la afluencia de caudales estimados hacia el humedal de estudio.

En el **Capítulo VII** (Análisis del balance hídrico regional incluyendo el factor antrópico) se calculó el balance hídrico, el cual representa uno de los aspectos de estudio fundamentales de la hidrología. El objetivo de esta etapa permitió establecer el estado de la oferta y demanda de los recursos hídricos en la zona (incluyendo a las cuencas aportantes al sitio Ramsar), así como también observar los posibles escenarios futuros y de remediación de acuerdo con los objetivos para el establecimiento de los caudales ambientales.

La situación actual y prospectiva del sitio Ramsar de estudio, teniendo como base a la Declaración de Brisbane (2018) y el VI informe del IPCC (2021) sobre el cambio climático, se estudió en el **Capítulo VIII** (Análisis basado en la Declaración de Brisbane [2018] y el informe del IPCC [2021] sobre los caudales ambientales en el sitio Ramsar). Asimismo, se hizo especial énfasis sobre la contribución de los humedales sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Agenda 2030).

REFERENCIAS

- Acreman, M. (2016). Environmental flows - basics for novices. *WIREs Water* 3, 622-628. Doi: <http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1160>
- Albiol, C. (2014). Análisis de las precipitaciones de Mendoza entre 1970 y 2010: variabilidad, tendencia y comportamiento cíclico. X Jornadas Nacionales de Geografía Física, Malargüe. Instituto de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Red Argentina de Geografía Física. Mendoza. Argentina.
- Albiol, C. (2018). Aplicación de criterios para la identificación de precipitaciones extremas en los oasis mendocinos, 1970 – 2010. *Vientos del Norte*, 6(2).
- Aquabook. (2016). Lagunas de Guanacache: valores hidrológicos, sociales y culturales. Gobierno de la provincia de Mendoza. Consultado de: https://aquabook.agua.gob.ar/456_0
- Arthington, A. (2012). *Environmental Flows: Saving Rivers in the Third Millennium*. Berkeley, NSW: University of California Press.
- Arthington, A. (2018). Environmental Flow Concepts and Holistic Applications in River Basin Governance. *Ecology, Economy and Society—the INSEE Journal* 1 (2): 73–76, July 2018. Doi: <https://doi.org/10.37773/ees.v1i2.37>
- Asociación de Inspecciones de Cauces, ASIC. (s/f). Requerimiento hídrico de los humedales en la cuenca inferior del río Mendoza, demanda ambiental y acciones, en el marco del cambio climático. Consultado de:

http://www.asicprimerazona.com.ar/asic/publicaciones/descentralizacion_administraci%F3n_agua.pdf

Barchiesi, S. Davies, P. Kulindwa, K. Lei, G. y Martínez Ríos del Río, L. (2018). Implementing environmental flows with benefits for society and different wetland ecosystems in river systems. Ramsar Policy Brief No. 4. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat.

Blanc, G. (s/f). Lagunas de Guanacache. Sitio Ramsar – Mendoza. Consultado de: <http://www.patrimonionatural.com/html/provincias/mendoza/guanacache/descripcion.asp>

Bruniard, R. (1982). La diagonal árida argentina: un límite climático real. Revista Geográfica. 95 (1982). Pp. 5 – 20.

Bussetini, M. (2018). Environmental Flows in Sustainable Integrated Water Resources Management. Boletín nº: Vol. 67 (1) – 2018. Organización Meteorológica Mundial. Consultado de: <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/environmental-flows-sustainable-integrated-water-resources-management>

Capitanelli, R. (1967). Climatología de Mendoza. Boletín de Estudios Geográficos. Nº 54-57, Vol. XIV.

CHD (2007). Caracterización de los caudales ambientales. Ministerio de Medio Ambiente. Confederación hidrográfica del Duero. Consultado de: <http://www.chduero.es/Portals/0/OficinaPlani/Sequias/Documentos/070313-Ane04Caudales%20ambientales-V04.pdf>

Chiavazza, H. y Prieto, M. R. (2008). Estudios arqueológicos en el Río Desaguadero. Runa 29. ISSN 0325-1217.

COHIFE, (2015). Seminario Internacional de Cambio Climático, Política Fiscal Ambiental y Caudales Ambientales: Desafíos y oportunidades para las energías Sostenibles en América Latina. Prensa COHIFE. Consultado de: <http://www.cohife.org/noticias/s38/seminario-internacional-cambio-climatico-politica-fiscal-ambiental-y-caudales-ambientales>

Conallin, J. Dickens, C. Hearne, D. y Allan, C. (2017). Stakeholder engagement in environmental water management. Water for the Environment: Policy, Science, and Integrated Management, eds A. C. Horne, J. A. Webb, M. J. Stewardson, B. Richter and M. Acreman (Cambridge, MA: Elsevier), 129–150.

Corona, G. y González, E. (2014). El “mar Aral” argentino: Breve historia de las lagunas de Guanacache. Documento de blog en línea. Consultado de: <https://animalderuta.com/2014/09/15/el-mar-aral-argentino-breve-historia-de-las-lagunas-de-guanacache/>

Del Pilar, A. y Corradine, M. (2014). Estimación del caudal ecológico por los métodos 7Q10, Q95% y los factores de reducción del 25 % en el río Ocoa, a partir de la generación de caudales diarios utilizando el modelo agregado de tanques. Especialización en Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C. Consultado de: http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2100/1/Estimaci%C3%B3n_de_caudal%20ecol%C3%B3gico.pdf

Dong, Q. (2014). Dams and Their Ecological Consequences. USGS Fort Collins Science Center. Consultado de: <https://www.usgs.gov/centers/fort-collins-science-center/science/ecological-flows#overview>

Dunbar, M. y Acreman, M. (2001). Applied hydro-ecological science for the twenty-first century. In: Acreman, M.C. (Ed.), Hydro-ecology: Linking Hydrology and Aquatic Ecology. International Association of Hydrological Sciences Publication. No., 266. IAHS Press. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK, pp. 1-17.

Dyson, M. Bergkamp, G. y Scanlon, J. (2003). Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. Tr. José María Blanch. San José, C.R.: UICN-ORMA. xiv+125 pp.

European Commission (2015). Ecological Flows in the Implementation of theWFD. CIS Guidance Document no. 31. Technical Report 2015-086. Bruselas.

Farr, T. Rosen, P. Caro, E. Crippen, R. Duren, R. Hensley, S. Kobrick, M. Paller, M. Rodriguez, E. Roth, L. Seal, D. Shaffer, S. Shimada, J. Umland, J. Werner, M. Oskin, M. Burbank, D. y Alsdorf, D.E. (2007). The shuttle radar topography mission: Reviews of Geophysics, v. 45, no. 2, RG2004. Doi: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Gez, J. (1938). Geografía de la Provincia de San Luis. Tomo III. Jacobo Peuser, Itda.

Horne, A. Webb, J. O'Donnell, E. Arthington, A. McClain, M. Bond, N. (2017b). Reseach priorities to improve future environmental water outcomes. Front. Environ. Sci 5:89. Doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00089>

Horne, A. Webb, Stewardson, M. Richter, B. y Acreman, M. (2017). Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management (Cambridge, MA: Elsevier). Consultado de: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128039076/water-for-the-environment>

Instituto Geográfico Nacional, IGN. (2016). Mapa Físico – Político de la Provincia de Mendoza. República Argentina. Ministerio de Defensa. Presidencia de la Nación. Consultado de: https://www.ign.gob.ar/gallery-app/provincias/medium/mendoza_linea.jpg

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.

International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN. (2003). Flow. The essentials of environmental flows. IUCN Publications Services Unit. Consultado de: http://www.ecosystemeconomics.com/Resources_files/FLOW.pdf

Jackson, S. (2017). How much water does a culture need? Environmental water management's cultural challenge and indigenous responses. *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management*, eds.

Kennen, J. Stein, E. y Webb, J. (2018). Evaluating and managing environmental water regimes in a water-scarce and uncertain future. *Freshw. Biol.* Doi: <https://doi.org/10.1111/fwb.13104>

King, J. y Brown, C. (2010). Integrated basin flow assessments: concepts and method development in Africa and South-east Asia. *Freshw. Biol.* 55, 127–146. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02316.x>

Kucharsky, T. (2018). Guía para la elaboración de estudios de caudales ecológicos en proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos. Corporación Andina de Fomento CAF. ISBN: 978-980-422-213-9. Consultado de: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1694>

Lauro, C. (2016). Estudio del comportamiento del régimen fluvial de las cuencas del oeste argentino y su vinculación con el cambio climático. Tesis doctoral para optar al título de Doctor en Ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina.

Lokgariwar, C. Chopra, R. Smakhtin, V. Bharati, L. y O'Keeffe, J. (2013). Including cultural water requirements in environmental flow assessment: an example from the upper Ganga River, India. *Water Int.* 39, 81–96. Doi: <https://doi.org/10.1080/02508060.2013.863684>

Lozano, G. Gómez, J. Triviño, H. Rodríguez, C. Monsalve, E. y García, P. (2010). Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos e hidráulicos para la UMC río Quindío. Corporación Autónoma Regional del Quindío. Universidad del Quindío – Grupo de Investigación CIDERA. Armenia, Colombia. Consultado de: https://www.crq.gov.co/Documentos/Estimacion_Caudales_Ecologicos_UMC_Rio_Quindio.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Lagunas de Guanacache, Desaguadero y Del Bebedero (Mendoza, San Juan, San Luis y APN). Gobierno de la República Argentina. Consultado de: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/agua/humedales/sitiosramsar/guanache-desaguadero-delbebedero>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2017). Humedales. Documento web. Consultado de: <http://ambiente.gob.ar/humedales/humedales/>

Moreiras, S. y Devincenzi, S. (2015). Geología del área del río Desaguadero. Restauración de un Sistema Ecológico Compartido. Capítulo I. Estudio Ambiental del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Editorial Dunken. Universidad de Congreso, Buenos Aires.

Nikitina, O. Dubinina, V. Bolgov, M. Parilov, M. y Parilova, T. (2020). Environmental Flow Releases for Wetland Biodiversity Conservation in the Amur River Basin. *Water* 2020, 12, 2812. Doi: <https://doi.org/10.3390/w12102812>

Norte, F. (1996). Mapa climático de Mendoza. Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina argentina. Caracterización general y estudios temáticos por provincia. Consultado de: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap03.htm#inhalt>

O'Brien, G. Dickens, Chines, E. Wepener, V. Stassen, R. y Quayle, L. (2017). A regional-scale ecological risk framework for environmental flow evaluations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 957–975. Doi: <https://doi.org/10.5194/hess-22-957-2018>

Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, OCHA. (2021). Sequía castiga a comunidades y agricultores de los Andes argentinos. Consultado de: <https://reliefweb.int/report/argentina/sequ-castiga-comunidades-y-agricultores-de-los-andes-argentinos>

Pahl-Wostl, C. Arthington, A. Bogardi, J. Bunn, S. Hoff, H. y Lebel, L. (2013). Environmental flows and water governance: managing sustainable water uses. *Curr. Opin Env. Sust.* 5, 341–351. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.06.009>

Poff, N. (2014). Rivers of the Anthropocene? *Front. Ecol. Environ.* 12, 427. Doi: <http://dx.doi.org/10.1890/1540-9295-12.8.427>

Poff, N. (2018). Beyond the Natural Flow Regime? Broadening the hydroecological foundation to meet environmental flow challenges in a nonstationary world. *Freshw. Biol.* Doi: <https://doi.org/10.1111/fwb.13038>

Poff, N. Tharme, R. y Arthington, A. (2017). Chapter11: Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies. *Water for the Environment: from Policy and Science to Implementation and Management.* (Cambridge, MA: Elsevier).

Ramsar. (2007). Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Servicio de Información sobre Sitios Ramsar. Consultado de: <https://rsis.ramsar.org/es/rs/1012>

Ramsar. (2014). Argentina. Secretaría de la Convención de Ramsar. Consultado de: <https://www.ramsar.org/es/humedal/argentina>

Ramsar. (2015). Call to action to ensure and protect the water requirements of wetlands for the present and the future. Resolución XII.12, 12th Meeting of the Conference of the Parties to the Convention on Wetlands (Ramsar). Consultado de: <https://www.ramsar.org/search?f%5B0%5D=type%3Adocument#search-documents>

Ramsar. (2015a). Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes. Nota Informativa Ramsar 7. Convención sobre los humedales Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Consultado de: <http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn7s.pdf>

Ramsar. (2015b). Humedales: fuente de medios de vida sostenibles. Nota Informativa Ramsar 7. Convención sobre los humedales Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Consultado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/fs_7_livelihoods_esp_v1-1.pdf

Ramsar. (2015c). Mantener las turberas húmedas para un futuro mejor. Nota Informativa Ramsar 8. Convención sobre los humedales Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Consultado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/fs_8_peatlands_es_v1.pdf

Ramsar. (2015d). Humedales: una protección natural frente a los desastres. Nota Informativa Ramsar 9. Convención sobre los humedales Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Consultado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/fs_9_drr_esp_30j.pdf

Ramsar. (2016). Introducción a la convención sobre los humedales. Manual de la convención de Ramsar. 5ta edición. Subserie I: Manual 1 Cooperación internacional sobre los humedales. Consultado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvention_s_final.pdf

Richter, B. y Thomas, G. (2007). Restoring environmental flows by modifying dam operations. *Ecol. Soc.*12 (art. 12).

Rolls, R. y Bond, N. (2017). Environmental and ecological effects of flow alteration in surface water ecosystems. *Water for the Environment*. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00004-8>

Sosa, H. (2007). Propuesta de ampliación del Sitio Ramsar. Nueva denominación Sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero.

Sosa, H. (2012). Restauración y conservación del Sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del bebedero. Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales. Oficina de Wetlands International en Argentina.

Sosa, H. Vaquer, G. Vallvé, S y Márquez, J. (1999). Ficha Técnica Lagunas de Guanacache. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. Consultado de: http://www.geocities.ws/guanacaches/sitio_ramsar_guanacache.html

Sosa, H. y Candia, R. (2015). Flora y fauna. Capítulo IV. Estudio Ambiental del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Editorial Dunken. Universidad de Congreso, Buenos Aires.

Sosa, H. y Vallvé, S. (1999). Lagunas de Guanacache (centro-oeste de Argentina). Procedimiento de inclusión a la convención sobre los humedales (RAMSAR, 71). *Multequina* 8: 71-85.

Tharme, R. (1996). A review of international methodologies for the quantification of the instream flow requirements of rivers. *Water law review report for policy development*. Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, South Africa.

Tharme, R. (2003). A global perspective on environmental flow assessment; emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research Applications*. 19:397 – 441.

The Brisbane Declaration (2007). Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being. 10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference (Brisbane, QLD). Consultado de: <https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/ELOHA/Pages/Brisbane-Declaration.aspx>

Torres, E. (2015). Hidrología del Río Desaguadero. Capítulo II. Estudio Ambiental del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Editorial Dunken. Universidad de Congreso, Buenos Aires.

UNESCO, (2014). Qué son los Caudales Ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay. PHI-VIII / Documento Técnico N° 34, 29 pp.

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza IUCN (2012). The Importance of Assessing the Water Needs of Wetlands in Order to Preserve Their Ecological Functions. Motion M087, Congress Document WCC-2012-9.6. World Conservation Congress. Consultado de: https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/2012_congress_all_motions_en.pdf

Wantzen, K. Ballouche, A. Longuet, I. Bao, I. Bocoum, H. Cissé, L. et al. (2016). River culture: an eco-social approach to mitigate the biological and cultural diversity crisis in riverscapes. Ecohydrol. Hydrobiol. (in press). Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.12.003>

Wetlands International LAC. (2014). Conservación y Restauración de las lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero en Argentina. Consultado de: <https://lac.wetlands.org/noticia/conservacion-restauracion-los-lagunas-guanacache-desaguadero-del-bebedero-argentina/#:~:text=En%20la%20actualidad%20las%20lagunas,de%20la%20cr%C3%ADa%20de%20cabras>

Capítulo II

HABITANTES DEL SITIO RAMSAR: DESCENDIENTES DE LOS HUARPES

INTRODUCCIÓN

En el capítulo III se analizarán las condiciones climáticas actuales de la zona de estudio, cuya aridez y semiaridez son responsables de las características del paisaje circundante. La escasa pluviosidad regional deja el recurso hídrico a las márgenes de los ríos que escurren desde la cordillera andina. Estos ríos (San Juan, Mendoza y Tunuyán) históricamente confluían en las zonas más bajas, cuya sedimentación permitió la presencia de humedales y lagunas extensas. Estos espacios fueron los oasis que los antiguos pobladores huarpes de la zona utilizaron por siglos como sitios de asentamiento.

Chiavazza y Prieto (2015) expresan que luego del período de conquista española (posterior a 1550):

“Se ofrece un panorama de ocupaciones dispersas a lo largo del río, que comenzaban en la Laguna de las Quijadas en el extremo norte y se prolongaban hasta el sur y Corocorto, vinculadas entre sí por caminos que unían caseríos asociados a cursos de agua y lagunas”.

Asimismo, estos autores señalan que de acuerdo con varias evidencias, el poblamiento de la zona se remonta al siglo IV D.C, asociado a la etnia huarpe y enmarcado dentro de la “cultura arqueológica de Agrelo”. Desde mediados del siglo XVI y con el período de conquista hispánica, Chiavazza y Prieto (2015) exponen que la zona del humedal de Guanacache estuvo definida en dos sectores distantes, cuya conexión se daba a través de la continuidad de las lagunas.

Luego de varios episodios de sequía hidrológica (atribuida a la variabilidad climática del momento) en los primeros siglos de la conquista, Vignati (1953) señala que en 1789 *“la causa de la disminución del agua en invierno, según los pobladores del área, era ya en esa época la retención de agua en el oasis por el uso intensivo que se hacía para irrigación y la variabilidad de la nieve en la cordillera”.* Asimismo y dados estos señalamientos, el autor resalta el gran número de lagunas en la zona, desde el noroeste hasta el sureste del actual sitio Ramsar.

Luego de los siglos XVII y XVIII la expansión del dominio español hacia la zona de humedales estuvo limitado por la aridez de la zona. Sin embargo, el dominio se hizo efectivo mediante el control de la región y de su población, que para 1756 alcanzaba las 491 personas de la etnia huarpe. De esta forma, los españoles llegaron a explotar la zona, extrayendo madera, peces y sal (Chiavazza y Prieto 2015).

Torres y Pastor (2015) reseñan que la zona fue un importante cruce de caminos y que su principal potencial (dado el declive de los humedales) era su población usada como mano de obra. Asimismo, con la llegada del ferrocarril hacia fines del siglo XIX, los cruces de caminos perdieron importancia, sólo para ser reactivados en el siglo XX por la construcción de las rutas nacionales 7 y 40, que atraviesan la zona en el SE y NO, respectivamente. Sin embargo y a pesar de la conectividad terrestre actual, la zona representa una región de olvido. Un oasis natural reemplazado por otros artificiales, cuyos remanentes y descendientes huarpes luchan por sobrevivir a la desaparición de espacios y culturas (Sosa y Vallvé, 1999).

Sin embargo, Minervini y López (2012) señalan que las comunidades que aún habitan el humedal han establecido fuertes lazos culturales a partir de los vínculos con su historia y ambiente. Referente a lo anterior, expresan que:

“La cultura es parte del ambiente, los hombres son parte de él, es el lugar de pertenencia y conforma la identidad de su gente”.

También, citan que:

“Los lazos humanos que se crean con los humedales van conformando tradiciones, determinando costumbres y creencias que influyen las actitudes y comportamientos de la sociedad”.

Por su parte, Sosa (2012) expone que la preocupación por la pérdida de ecosistemas y espacios culturales llevó a elevar la zona a sitio Ramsar de protección internacional en 1999. Mediante trabajo de campo, este autor expone que la evolución histórica de degradación del humedal acarrió pérdida de identidad cultural, problemas económicos, despoblamiento y emigración masiva de jóvenes. Sin embargo, uno de los aspectos que más resalta Sosa (2012) radica en la conservación y restauración de espacios naturales, los cuales pueden ayudar a preservar la memoria colectiva y los patrimonios culturales intangibles de las pocas personas que aún habitan la zona.

En el presente capítulo, el objetivo del estudio se orienta a observar los vínculos de la relación sociedad – naturaleza dentro del ámbito del sitio Ramsar. Asimismo, dicho análisis estará basado en descripciones de tópicos locales, como población, cultura, economía, uso del agua, relación con caudales ambientales e identidades culturales, sensitivas y emocionales.

METODOLOGÍA

La investigación de este capítulo parte desde un enfoque cualitativo, en el cual se abordarán aspectos descriptivos relacionados a la sociedad y sus vínculos con el paisaje del Ramsar circundante. La información utilizada tiene base en artículos científicos, publicaciones oficiales y documentales gráficos, sobre los

cuales se realizan descripciones y análisis a fin de establecer lazos entre la sociedad y el ambiente de la zona.

El capítulo se divide en tres aspectos principales, los cuales desarrollan la idea del lazo sociedad-naturaleza en el sitio Ramsar, estos son: “los descendientes de los huarpes” (vinculado a la población), “economía, uso del agua y su relación con los caudales ambientales” (asociado a la matriz económica y de uso de agua en la zona) y “la cultura y la identidad asociada a las lagunas” (relacionado con el sentido de identidad de los habitantes de la región con su entorno).

Los descendientes de los huarpes

Respecto a la población, se analizaron diversas fuentes de información (p. ej., INDEC, artículos científicos, publicaciones de prensa, etc.) con el fin de establecer la ubicación, tamaño y proyecciones de población de los asentamientos del sitio Ramsar.

Economía, uso del agua y su relación con los caudales ambientales

Mediante el análisis descriptivo de diversas fuentes de información (p. ej., artículos científicos, publicaciones de instituciones oficiales, portales de noticias, entre otros), se analizó la matriz productiva y económica de las poblaciones que viven en el sitio Ramsar. Asimismo, se estableció un vínculo entre la economía, el uso del agua (p. ej., con fines agrícolas) y los caudales ambientales. De esta forma, se establecieron conclusiones acerca de los lazos económicos entre el agua y la productividad de la región.

Esfuerzos locales e institucionales para la remediación del humedal

Como parte de testimonios institucionales y sus vínculos con las localidades, en esta sección se enfatiza y analiza (mediante revisión bibliográfica) acerca de los esfuerzos estructurales (con financiación pública y privada), legales (desde el Estado Nacional y Provincial) y de conciencia ciudadana (Organizaciones no gubernamentales) que se han llevado a cabo para remediar los humedales locales. Asimismo, se exponen los principales retos y los objetivos a lograr para la preservación y remediación de humedales degradados.

La cultura y la identidad asociada a las lagunas

La identidad lagunera

Vinculado a la cultura y patrimonio, se estableció un análisis acerca de las identidades locales, acción territorial y dinámicas de desarrollo (Bustos Cara y Martín, 2021), con el fin de establecer una relación sociedad-naturaleza desde la complejidad y hacia el análisis de su Geografía Social (Lorda y Krasner, 2021).

El análisis de identidad se enmarca en los términos de: identidad, patrimonialización y territorialización, así como los procesos inversos de desterritorialización, despatrimonialización y pérdida de identidad.

Identidad: representa un proceso dinámico y evolutivo de construcción social asumido, el cual demanda un reconocimiento de pertenencia sobre un aspecto importante para el que lo manifiesta, pudiendo ser de tipo territorial (Bustos, s/f), o incluso escalando a ámbitos sociales, políticos, religiosos y laborales (Gialdino et al., 2006).

Patrimonialización: representa el sentido de transformación de objetos y valores en referencias de identidad e importancia para quién los apropia. Implica de esta forma la toma de consciencia identitaria sobre un elemento que comienza a pertenecer (Bustos, s/f). El diccionario de la Lengua Española lo define como el proceso de hacer que algo pase a formar parte de los bienes materiales o inmateriales que se consideran como propios (RAE, 2021).

Territorialización: proceso de apropiación del espacio (transformación en territorio), propiciados por actores definidos como productores y “consumidores” del espacio, como son entre otros el Estado, las colectividades locales, las empresas, los individuos, etc. (Scheibling, 1994, citado por Giménez, 2007).

Las emociones hacia el territorio

Posteriormente y basado en el Análisis Crítico del Discurso (Van Dijk, 2002; Lorda y Kraser, 2021), el componente sensorial (emociones) se desarrolló sobre la base del análisis de un documental cinematográfico (Roig, 2007), el cual asocia al desierto de Guanacache sobre la base de los retratos de sus habitantes y el valor que éstos le otorgan al territorio.

Expresiones musicales

Finalmente y como parte de una de las expresiones culturales regionales, se hace mención y análisis sobre la obra musical “Requiem por Guanacache”, con letra y música de los artistas mendocinos Armando Tejada Gómez y Daniel Talquenca (Tejada Gómez y Talquenca, 2013. 2m36s). Dicha canción es parte de su disco “Tonada Larga para el País del Sol” (2013), recitada bajo el género musical de “Huayno”. En los versos recitados y a modo de lamento, los compositores exponen la realidad de Guanacache y el sentimiento que sus pobladores expresan de su entorno.

El análisis de cultura e identidad pretende interpretar la cultura, formas de vida y producción de los pobladores del sitio Ramsar, así como las lógicas socioespaciales que los envuelven. Esto otorga una importancia sensitiva y emocional que da fuerza a la protección legal que actualmente presenta el territorio.

RESULTADOS

Los descendientes de los Huarpes

De acuerdo con Wetlands International LAC (2014) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022), dentro de los límites del sitio Ramsar viven aproximadamente 2000 personas. Blanc [s/f] establece un máximo de 4000 habitantes repartidos principalmente entre 12 comunidades. Buena parte de esta población es descendiente del pueblo Huarpe, que habitó la zona de humedales, bañados y lagunas siglos atrás. La ubicación de los asentamientos actuales está atada a su historia remota y reciente, por lo que sus ubicaciones proporcionan indicios indirectos acerca de los recursos hídricos y la conectividad terrestre (Figura 2.1).

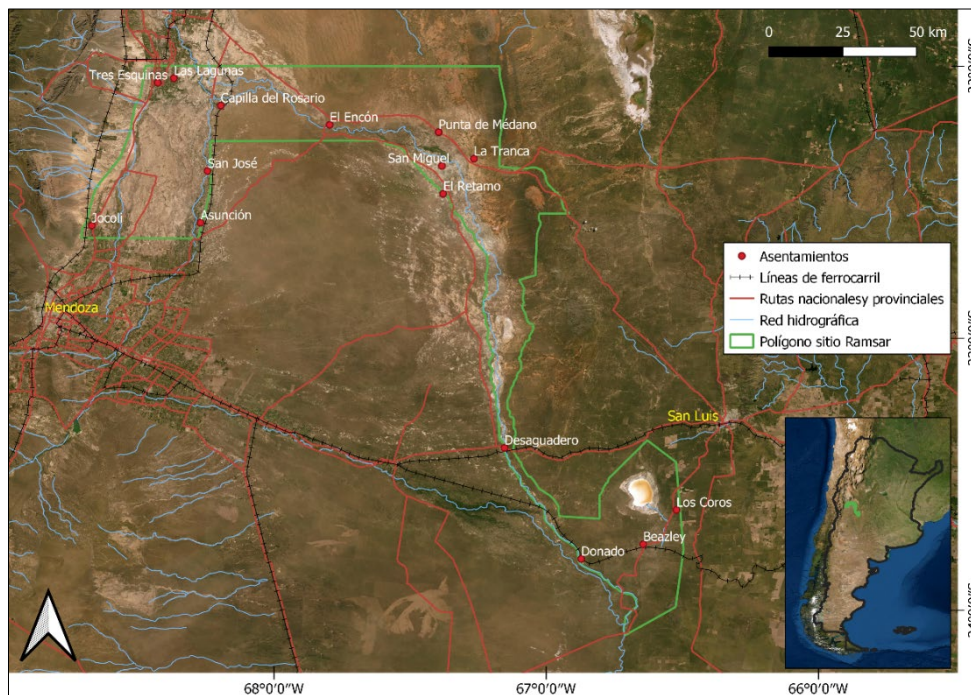


Figura 2. 1. Ubicación de asentamientos y vías de comunicación en la zona circundante al sitio Ramsar de estudio. Fuente de datos: IGN (2020).

La mayoría de los asentamientos se encuentran ubicados en las márgenes de rutas provinciales o nacionales, vías de ferrocarriles o cauces fluviales (Figura 2.1). Además de la provisión de agua que proporcionan los ríos, la conectividad era importante al ser ruta usual de caminos hacia otras provincias. Los cerca de 2.000 a 4.000 habitantes registrados se ubican predominantemente dentro del departamento mendocino de Lavalle (Figura 2.2).

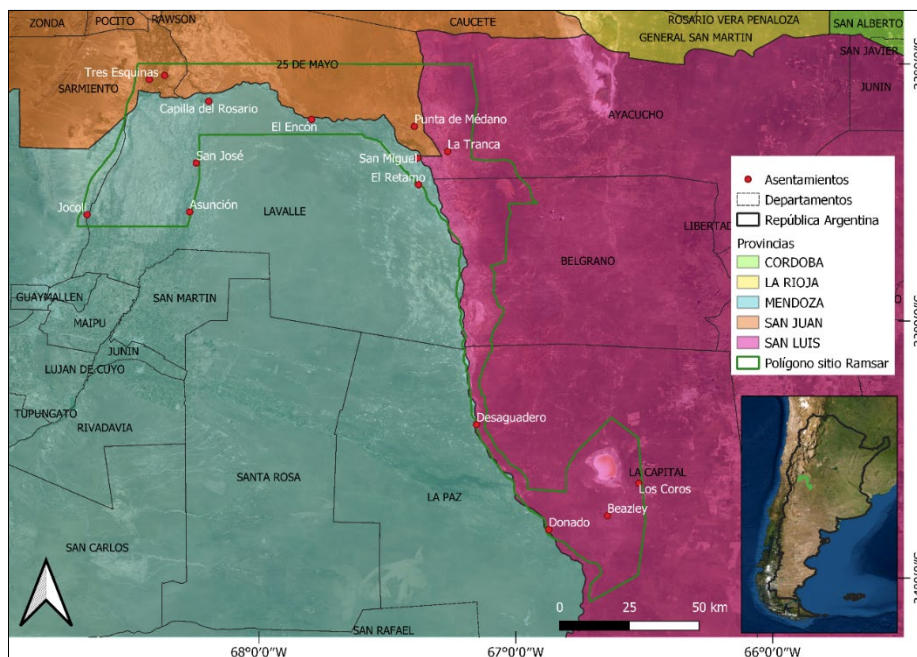


Figura 2. 2. División política departamental del sitio Ramsar. Fuente de datos: IGN, (2020).

Si bien no se cuenta con datos demográficos específicos para cada localidad, en la Tabla 2.1 se presentan los números de habitantes de algunos de ellos.

Tabla 2. 1. Localidades o asentamientos dentro del sitio Ramsar de acuerdo con diversas fechas de registro oficial y estimación.

Localidad	Población (habitantes)	Fecha de estimación	Fuente de datos
Jocolí	318	2001	INDEC (2001)
Asunción	859	2010	INDEC (2010)
Capilla del Rosario	1.042	2010	INDEC (2010)
El Encón	318	2001	INDEC (2001)
San Miguel	300	2017	Los Andes (2017)
El Retamo	640	2017	Los Andes (2017b)
Desaguadero	520	2010	INDEC (2010)
Beazley	1.100	2010	INDEC (2010)
Total	5.742 habitantes		

El total de habitantes se aproxima más a la estimada por Blanc (s/f) de acuerdo con los datos presentados en la Tabla 2.1. Tomando como referencia el crecimiento de la población del departamento con más representación en el sitio Ramsar (Lavalle, período 2011 – 2020: +13,41 %), la población total indicada en la Tabla 2.1 se proyectaría a 6.512 habitantes (2020). Por su parte, con un 18,82 % de crecimiento entre 2011 y 2025, para este último año la población alcanzaría 6.822 habitantes (Fuente de datos y proyecciones: INDEC, 2015).

Cabe destacar que uno de los principales problemas reseñados por Sosa (2012) es la emigración (sin datos actuales), con especial énfasis en jóvenes. Entre las causas, directas o indirectas, resaltan la falta de oportunidades de desarrollo, vinculada a la degradación de espacios naturales y a la aridez creciente de las tierras. Esta situación hace que la proyección de población calculada en el párrafo anterior deba ser observada desde un punto de vista conservador, ya que corresponde al total del Departamento de Lavalle (cuyas máximas densidades se encuentran al suroeste, sobre las márgenes del oasis irrigado).

Este argumento podría situar la población proyectada entre 6.000 y 7.000 habitantes, tomando como referencia el período de los años 2020 a 2025. En cuanto a la densidad de población y considerando los 9.600 km² de superficie del sitio Ramsar, presenta valores entre 0,63 y 0,73 habitantes/km², lo cual indica un estándar de densidad poblacional muy baja.

Si bien el sitio Ramsar es una zona bajo una figura de protección internacional de humedales, desde el punto de vista geográfico y de apropiación del territorio, la baja densidad añade el problema adicional de la escasa apropiación del territorio. Es decir, si la mayoría de la población se concentra alrededor de los oasis irrigados de San Juan y Mendoza (aglomerados que superan en conjunto los 3.000.000 de habitantes), la escasa población dentro del sitio Ramsar hace que la importancia relativa del territorio cuyo peso sobre los sitios más poblados, dejando vastas zonas sin población.

Economía, uso del agua y su relación con los caudales ambientales

Evidentemente, cuando el paisaje de la región cambió, también lo hicieron algunas actividades económicas. De esta forma, hallazgos arqueológicos han encontrado restos de explotaciones económicas de peces (principalmente percas criollas y pejerreyes patagónicos) en las zonas cercanas a las lagunas de Guanacache (Corbat et al., 2015). Previo a que los cambios mencionados mermaran la economía tradicional de la región, los huarpes practicaban la recolección, caza, pesca y ganadería de llamas. Sus vínculos económicos giraban entre los bordes de los humedales y las zonas áridas, así como con el comercio con los Mapuches del sur y los Incas del norte (Manzur, 2007). Posterior a los cambios de paisaje y desecación de lagunas, los habitantes que quedaron tuvieron que adaptarse a su entorno (Michieli, 1900, citado por Pueblos Originarios, s/f).

Desde el gobierno de Mendoza (Aquabook, 2016) señalan que, dentro del sitio Ramsar, se desarrollan actividades como la ganadería (principalmente caprina), pastoreo comunitario (rebaños compartidos entre puesteros), agricultura (con cultivos de ciclo corto en suelos lacustres y actividades manufactureras a partir de gramíneas (fabricación de escobas y cesterías). Abraham y Vitarelli (2014) exponen que la situación ambiental de los humedales en la zona ha generado un "área ambientalmente frágil", asociada principalmente al desecamiento de las lagunas y a la situación de vulnerabilidad que genera sobre las poblaciones

aledañas. Desde Wetlands International (Wetlands LAC. 2014) enfatizan en el problema de la falta de agua para los humedales como el factor que amenaza la supervivencia de los pobladores del sitio Ramsar, “los cuales no tienen agua para riego o para brindarle a su ganado”.

Con la desecación de las lagunas y la pérdida de oportunidades, la emigración hizo disminuir la población local, decreciendo así el potencial económico y de desarrollo. Las personas que siguen en el lugar optan por la ganadería extensiva (principalmente caprina) y sobre lugares donde aún pueden conseguir pasto y agua (OCHA, 2021). Esta organización (Oficina de Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios) explica que muchos habitantes han recurrido a la perforación de pozos, con el fin de satisfacer necesidades hídricas personales y de sus actividades económicas; sin embargo, el agotamiento de los recursos hídricos los ha secado, obligándolos a moverse o emigrar.

Por su parte, el portal ViaPaís (2020) hace referencia a la problemática local, el cual, mediante entrevistas y visitas de campo relata que, en promedio, los pobladores consumen unos 40 l/p/d (litros por persona, por día), los cuales contrastan con los 250 l/p/d recomendados por organismos mundiales (p. ej., Organización de las Naciones Unidas). En este sentido y en términos relativos, los locales consumen un 160 % menos de agua que el recomendado. Refiriéndose a esta problemática, el investigador Heber Sosa (referente regional en el establecimiento y protección de la figura del sitio Ramsar), entrevistado por Diario UNO (2019) explica que, dado que los ríos no están llegando al sistema, los pobladores se ven en la necesidad de cavar pozos y sacar agua con balde para dar de beber a sus animales.

En este sentido, el vínculo de la problemática ambiental y comunitaria respecto al agua justifica el objetivo de uso de los caudales ambientales. El flujo de escorrentía continua en los afluentes permitiría una recuperación de las lagunas, la recarga de las aguas subterráneas, la inundación de zonas riparias y, por ende, el sustento económico de las comunidades locales.

Omar Romero Díaz, puestero de la zona y entrevistado por Gordillo (2021), expresa que:

“El agua es todo acá en el secano, te genera un impulso en todos los sentidos y acá no tenemos una precipitación para que se pueda vivir del agua de lluvia. Pero somos muy pequeños para protestar por el tema del agua, ya que son los grandes inversores los que la ocupan para otras cosas y acá se fue perdiendo”

Este puestero y habitante de Guanacache indicó, además, que la degradación del humedal cambió su forma de vida y la de sus semejantes locales, cuyas actividades ganaderas se redujeron en hasta un 80 % en los últimos años (Gordillo, 2021). Sin embargo, como se explicará en el Capítulo V, los caudales ambientales no representan la realidad, sino una propuesta para satisfacer las necesidades hídricas de los ecosistemas y sociedades involucradas, aguas

abajo de los aprovechamientos económicos masivos. En este sentido, reducir el tamaño de la economía en los oasis aguas arriba, para permitir el flujo de caudales ambientales, no es un objetivo realista. Las comunidades del sitio Ramsar están conscientes, por lo que los esfuerzos por remediar el problema se orientan a acciones locales y en conjunto con los habitantes locales.

Esfuerzos locales e institucionales para la remediación del humedal

Los azudes

Luego de nueve años, Wetlands International LAC (2021) expresa que han logrado recuperar algunas zonas mediante la construcción de azudes para el llenado con agua de lluvia. Desde el 2011 y a través de ayudas locales y externas (p. ej., Fundación AVINA y Coca-Cola) trabajaron en la remediación de 1.000 hectáreas de humedales, mediante la realización de 16 obras de restauración en las localidades de San Miguel, El Retamo y El Forzudo (Figura 2.1). Se benefició a 300 familias y recuperó (entre 2011 y 2016) más de tres millones de metros cúbicos de agua (Wetlands International LAC, 2017). Hasta 2021, el total de azudes construidos por parte de este organismo asciende a 90, así como 23 obras de restauración en la zona (Gordillo, 2021b).

El diccionario de la Real Academia Española (DLE, 2022), define un azud como una *“barrera hecha en los ríos con el fin de facilitar el desvío de parte del caudal para riego y otros usos”*. Sin embargo, en la región de estudio, tradicionalmente la definición concuerda con la Prensa de la Secretaría De Ambiente y Desarrollo Sustentable de Mendoza (2022), la cual define los azudes como pequeños diques impermeabilizados (Figura 2.3), cuyo objetivo es la reconstrucción de humedales mediante el llenado e inundación de la zona riparia adyacente, así como la recuperación de especies propias

La técnica se conoce como “cosecha de agua”, ya que tiene como objetivo concentrar el agua derivada de precipitaciones antes que se infiltre o siga escurriendo (Pellegrinuzzi, 2021). Mediante estos esfuerzos, permiten el llenado de las profundas barrancas excavadas por la erosión, disminuyendo la desecación progresiva y ayudando a la restauración de las zonas riparias y las comunidades locales (Figura 2.4).



Figura 2. 3. Construcción de azud en la zona cercana a San Miguel (Figura 2.1). Consultado de: Wetlands International LAC. (2021).



Figura 2. 4. Restauración de espacios mediante la construcción de azudes en la zona cercana a San Miguel (Figura [2.1](#)). Consultado de: Wetlands International LAC. (2021).

A través de estos trabajos, destacan el rol de los líderes sociales, así como la participación de las mujeres en los trabajos de obras. De esta forma, la inclusión de la sociedad local se hace efectiva en las obras que permiten que se restauren sus espacios (Wetlands International LAC, 2021).

Desde el lado gubernamental (Gobierno de la Provincia de San Juan, limítrofe hacia el norte) (Figura [2.2](#)), los esfuerzos buscan que las comunidades comiencen a diseñar proyectos autoproducidos con el fin de generar mano de obra para los miembros de la comunidad (Prensa Ministerio De Desarrollo Humano y Promoción Social, 2020). Adicionalmente, financian obras de remediación, cuyos trabajos incluyen la construcción de azudes y represas que permitirán la restauración de humedales y la captura de agua de lluvia (Prensa Secretaría De Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2022). Desde este organismo, expresan que además de seis azudes en proceso de obra, prevén la construcción de otras 15 en la región del sitio Ramsar que limita con la provincia de San Juan (Figura [2.2](#)).

Las dimensiones de algunos de los azudes construidos por esta institución tendrán hasta 30 metros de ancho, 30 metros de largo y 2 metros de profundidad. Su llenado provendrá de las escorrentías superficiales que se originan luego de las escasas lluvias locales (Prensa Secretaría De Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2022). A través del Gobierno de San Luis (al este del sitio Ramsar) (Figura [2.2](#)), proyectaron la construcción de dos azudes interprovinciales (en conjunto con Mendoza), sumadas a las dos existentes y construidas desde San Luis (2014), las cuales cuentan con 6 metros de altura y 750 de longitud sobre el río Desaguadero. Estas obras permitieron comenzar con la recuperación del llenado del cauce y la inundación de las franjas riparias. En su momento, el Gobernador de San Luis expresó: “nace otro panorama para las economías locales” (El Diario de la República, 2014; Prensa Gobierno de Mendoza, 2015).

Las legislaciones

La Convención Internacional sobre Humedales (Ramsar, 2015) fue suscripta en 1971 (Ramsar, Irán) y adscrita por Argentina mediante la Ley 23919 en 1991 (Argentina.gob.ar. 2022). Su objetivo en macroescala es la conservación y uso racional de los humedales a través de acciones locales y regionales, a fin de preservarlos como patrimonio natural, representando así el único tratado mundial que trabaja sobre un único ecosistema (Ramsar, 2015). Junto a las partes contratantes, desde esta organización se fomentan políticas y planificación de uso de la tierra sustentables, concienciación social sobre humedales, incentivo a la financiación entre organismos públicos y privados y planes de desarrollo en conjunto para preservación y remediación de humedales (Ramsar, 2015).

Desde el gobierno nacional, el ministerio competente (Ambiente y Desarrollo Sostenible) actúa como agente técnico de la convención, ejecutando sus lineamientos sobre los sitios Ramsar que posee el país. La articulación en este sentido depende de la importancia del sitio y de la financiación que se otorgue para su desarrollo, preservación o remediación. Organizaciones sin fines de lucro y colectividades en general se han organizado para presentar un proyecto de ley que, conforme al artículo 41 de la Constitución Nacional, asegure los recursos presupuestarios para la protección ambiental de los humedales (Humedales Sin Fronteras, 2022). En este sentido, se insta a que la Ley de Humedales propuesta, incluya aspectos esenciales, como el uso respetuoso de los espacios, fondo para humedales, participación ciudadana y con perspectiva de género y el fomento de un inventario de humedales y las sociedades que los habitan.

Desde el 2013 se presentaron varios proyectos de Ley de protección de humedales, los cuales perdieron vigencia con el tiempo. Para 2020, el número de proyectos ascendió a 13, llegando el 2022 con el proyecto de Ley de Presupuestos Mínimos para la Protección de Humedales en discusión desde el Congreso de la Nación (Amnistía Internacional, 2022).

Desde el proyecto de Ley (H. Cámara de Diputados de la Nación, 2020) que aún se discute en el Congreso de la Nación (Régimen de presupuestos mínimos para la protección ambiental de los humedales), en su Artículo 1º especifica que el objetivo es:

“...establecer los presupuestos mínimos para la conservación, uso racional y sostenible de los humedales en todo el territorio de la Nación, asegurando la integridad de los servicios ecosistémicos que brindan, como así también el respetar de su valor inherente, en concordancia con el artículo 41 y 75 inc. 17 de la Constitución Nacional, los Tratados Internacionales ratificados por el Congreso de la Nación y la Ley General del Ambiente N° 25.675”.

Cabe destacar que, desde este proyecto de Ley, se define al caudal ambiental como:

“Aquel régimen hídrico que se establece en un cuerpo de agua, como una alternativa que busca encontrar un equilibrio entre las necesidades del ambiente y las humanas, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural y todas las funciones ambientales”.

Desde Organizaciones no gubernamentales como CasaRío, Taller Ecologista, Cauce y FARN (Humedales Sin Fronteras, 2022), se insta a que las legislaciones nacionales, en conjunto con las medidas de protección provinciales, permitan preservar y restaurar humedales, protegiendo su biodiversidad y sociedades inmersas. Desde Wetlands International LAC, el biólogo Heber Sosa sostiene que:

“Mendoza les quitó el derecho al agua a las comunidades que viven fuera de los oasis. Por eso, es clave que Argentina apruebe una ley de humedales, que permitirá regular el recurso no solo para uso humano, sino también ecológico y ambiental” (Gordillo, 2021b).

Desde los esfuerzos locales, Heber Sosa expresa que se cuenta con la Ley de Ordenamiento Territorial y los lineamientos de la Dirección de Recursos Naturales Renovables y la Secretaría de Ambiente, así como la Ley de Áreas Protegidas (6045) y la Ley del Ambiente (5961). Sin embargo, son las vastas zonas que requieren atención y no todas la reciben, sobre todo las personas afectadas (Gordillo, 2021b).

El problema que Sosa manifiesta sobre el cuadro legal y de acción en la región, radica en que las leyes son sensibles y aplicadas a las zonas donde habita la mayor parte de la población (oasis). Esto implica que, si el oasis no está afectado, las leyes no actúan, por lo que la consciencia ciudadana se vuelve importante (Gordillo, 2021b).

La consciencia ciudadana y la visibilización del problema

Mediante la divulgación de materiales escolares (Figura 2.5) o de índole técnica (p. ej., materiales referentes a Wetlands International LAC, 2012), las organizaciones públicas y privadas tratan de visibilizar el problema, los afectados involucrados y las posibles soluciones. En la región de Cuyo, el agua es un tema socialmente sensible, por lo que la población generalmente es empática en cuanto a su cuidado y preservación. Sin embargo, es contradictorio concienciar cuando la gran mayoría de la población vive y se beneficia (directa o indirectamente) de los oasis irrigados. En este sentido, el objetivo radica en reforzar la idea de los derechos de aquellas minorías que habitan en las zonas degradadas, cuyos detrimentos en calidad de vida se deben a un uso inadecuado y desmedido de los recursos hídricos aguas arriba.

Como se ha mencionado previamente, si la patrimonialización del territorio falla por ausencia física y económica de los involucrados, el apoyo para la

restauración debe provenir desde afuera de sus límites. De esta forma, mientras las mayorías en los oasis adquieran consciencia sobre el asunto, la presión sobre las instituciones involucradas aumentaría, incentivando a la resolución de problemas y a la asistencia financiera de proyectos de remediación.



Figura 2. 5. Manual educativo ambiental sobre el sitio Ramsar. Fuente: Minervini y López (2012).

La cultura y la identidad asociada a las lagunas

La identidad “lagunera”

Luego de la época colonial, las fundaciones de ciudades aguas arriba del sitio Ramsar, establecieron nuevos espacios apropiados, o nuevos territorios. Si bien los protagonistas de estas apropiaciones no eran autóctonos, con el paso del tiempo fueron representando el pilar de desarrollo de la región. De esta forma, el uso del recurso hídrico para consumo doméstico y agrícola en los oasis circundantes fue destinando a los escurrimientos hídricos andinos para unas tierras que natural e históricamente no la ostentaban. Así, progresivamente y sumado a elementos naturales de variabilidad climática, la desecación de las vastas zonas lagunares había comenzado. Con esto, cientos de años de historias locales, identidades y territorios fueron perdiéndose en el tiempo (Figura 2.6).

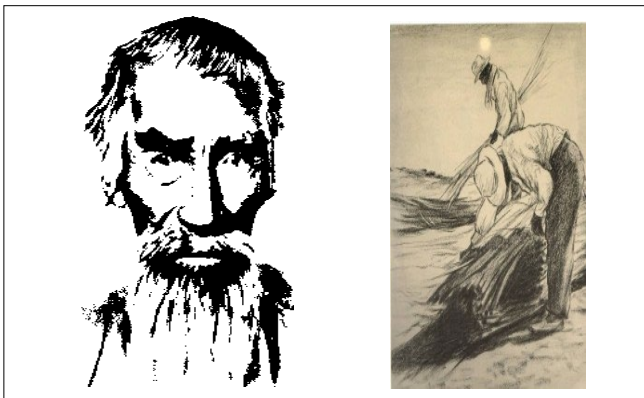


Figura 2. 6. Semblanzas de Guanacache, antiguos pobladores de la zona. Fuente: Roig (2007).

Las localidades huarpes, al ser conscientes de su cultura y existencia ligada al entorno, eran a su vez portadoras de una identidad única, lo cual llevó a la patrimonialización del espacio circundante y a la territorialización del oasis natural. Así, un espacio ancestral, pasó a ser su territorio de vida. El proceso inverso, producto de la alteración de los flujos de agua que alimentaban los humedales y progresiva desecación del oasis, propició la desterritorialización, producto de la masiva emigración por falta de oportunidades. Al no estar presentes, la despatrimonialización desencadenó con el tiempo la pérdida de identidad, conforme iban muriendo las viejas generaciones.

Si bien es evidente la desterritorialización física por pérdida de condiciones naturales y emigración humana, Giménez (2007) expresa que dicha situación no implica la desterritorialización en términos simbólicos ni subjetivos, lo cual conllevaría que aún existan elementos de arraigo e identidad. Este autor también menciona que:

“Se puede abandonar físicamente un territorio sin perder la referencia simbólica y subjetiva al mismo a través de la comunicación a distancia, la memoria, el recuerdo y la nostalgia”.

De esta forma, aun cuando lo sucedido es un hecho histórico, responde a las dinámicas territoriales que por diversas razones (válidas o no), se suscitan en el mundo. De allí la importancia de reconocer los factores que poseen un rol fundamental en ello. Dada la realidad actual de la zona, en las áridas tierras cuyanas las tierras de secano o desérticas “no tienen” ningún valor para el resto de las provincias limítrofes, ya que no pueden cultivarse intensamente. Así, por ejemplo, el 97 % del territorio mendocino perteneciente al secano, es invisible. Con esta inexistencia asumida y cotidiana, cientos de familias del norte árido aún luchan por existir y persistir en el tiempo, así como su cultura e historia.

Las emociones hacia el territorio

Como parte del proceso de identidad, la cineasta Valeria Roig produjo un documental (Roig, 2007) basado en entrevistas a descendientes huarpes de la región de Guanacache. El documental parte con la vista verde de una ciudad de

Mendoza exuberante y próspera, pasando luego al agreste y árido paisaje de Guanacache. Con esto, se reafirma que todo el verde exuberante no está en la actualidad donde debería estar realmente. Es artificial. La portada del documental así lo manifiesta (Figura 2.7). Esto último, lo entendieron los huarpes al asentarse sobre el vergel natural de la región, los verdaderos oasis del desierto (Figura 2.8). En esa zona, confluían los ríos andinos, formando amplios humedales y bañados interconectados por vastas lagunas, las cuales eran utilizadas para la navegación y la pesca tradicional. De esta forma, sus descendientes se convierten en los protagonistas del documental de Valeria Roig.

En 2007 y según la autora, había cerca de 3.000 pobladores en la zona, la mayoría descendientes de los antiguos huarpes. Con sus tradiciones mezcladas e identidades propias, habitaban más de 700.000 hectáreas que no eran de su propiedad, ni mucho menos del agua que la “modernidad” les quitó al represar y sobreexplotar los recursos hídricos aguas arriba. Así, el ancestral proceso de patrimonialización y territorialización comenzó su declive hacia sus inversas, pasando de territorios a espacios.

De esta forma, el otrora exuberante vergel, con lagunas y bañados fue desapareciendo con el tiempo, dejando sus moradores entre la diatriba de emigrar (como lo terminaron haciendo muchos), o permanecer y luchar por sus tierras.



Figura 2. 7. Portada del documental: “Huanacache, Retratos en el Desierto”. Fuente: Roig (2007).

En el documental se exponen los relatos coloquiales y tradicionales de varias personalidades de la zona, repartidos entre el campo abierto y algunos centros poblados pequeños. Allí, Eduviges Molina (encargada del museo comunitario del desierto y entrevistada por Roig) expresa: *“las lagunas no son permanentes; llega agua sólo cuando sobra en el oasis; ya no hay balsas ni pesca”*. En el documental, su voz, no quebrantada pero sí con vestigios de pesadez, exponen

la realidad más visible: la ausencia del agua. En su museo, varias obras (incluyendo algunas del catalán y pintor de principios del s. XX, aficionado por Guanacache, Fidel Roig Matóns) contrastan los antiguos verdes con los marrones del documental. Así, Molina expresa finalmente con clara emoción reprimida: “*es algo a lo que nos acostumbramos*”. Indirectamente, el documental expone de forma magistral los impactos severos de las actividades agrícolas cuando los recursos hídricos son escasos. En este caso, utilizado por los vastos oasis artificiales de Mendoza y San Juan, privando del vital líquido a las zonas bajas de la región, antes ricas en agua.

Dada la vocación de los oasis artificiales cuyanos, el desarrollo y modernismo del siglo XX transformó el paisaje regional, cambiando oasis naturales por oasis artificiales y biodiversidad y cultura asociadas al agua por el vino que mueve la actual economía de Cuyo. En este sentido, el contraste dual resulta polémico. Si bien la modernidad les quitó la esencia acuícola, también debió adaptarse a quienes le hacían frente a la situación y decidían quedarse. Así, décadas después y en medio de luchas justas, terminaron teniendo una escuela, un centro de servicios comunitarios y un centro de salud (Roig, 2007).

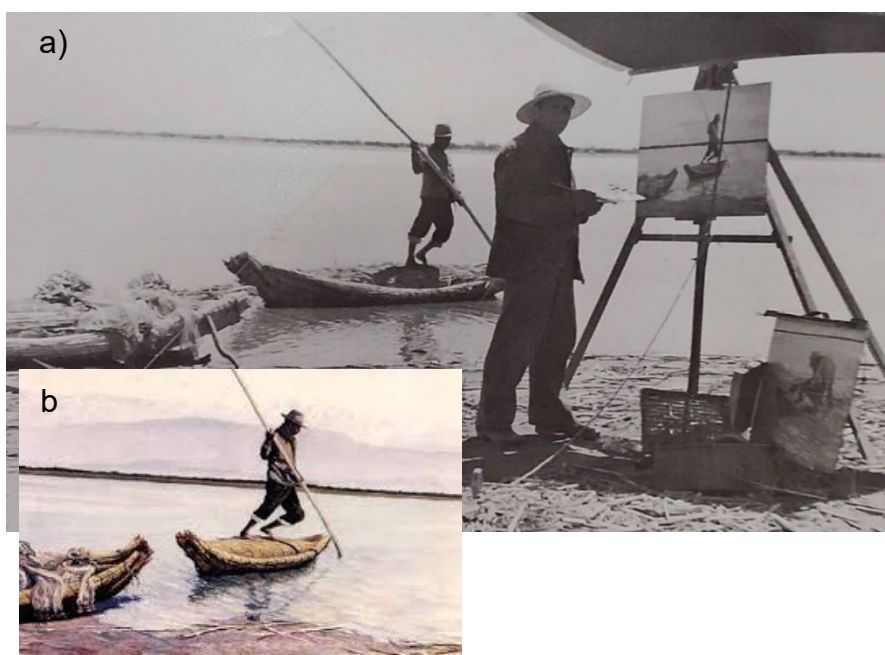


Figura 2. 8. Fotografía de Fidel Roig Matóns dibujando a un hombre que navega en una de las ahora extintas lagunas (noroeste del sitio Ramsar) sobre su balsa (a). Cuadro “Partiendo para la pesca”, carbonilla y óleo de Fidel R. Matóns (b). Fuente: Roig (2019).

Siguiendo con Eduviges, ésta llevó a Valeria al puesto ancestral de su familia (Molina) en el campo abierto. Allí destacan la rudeza del desierto junto a las bondades que sus familiares ven con amor en él: los animales y la cosecha de las pocas plantas que crecen. Dice Eduviges con claro orgullo por permanecer allí:

“no es fácil vivir acá, pero tengo vocación por servir a mi pueblo y valorar la identidad huarpe, ahora con orgullo y sin la vergüenza de antes”.

De esta forma, el documental invita al espectador a conocer lo previo al “desarrollo”, pero también lo que sucedió después, donde la autora dio paso a mostrar y reproducir imágenes, sonidos y charlas cotidianas, con el fin de exponer una realidad paralela y olvidada.

El panorama que se tiene en la actualidad, a 14 años de realizada la filmación analizada, sigue siendo mucho más sombría, ya que es exacerbada por la influencia del cambio climático y las cada vez más frecuentes sequías nivales en la cordillera (fuente de agua por fusión nival a los ríos). Hacia el final del documental, Valeria Roig se acerca al poblado de Asunción (Figura 2.1), donde una pobladora entrevistada (María Romero) explicaba cómo su padre sembraba y aprovechaba con amplitud el agua del río Mendoza (hoy inexistente en la zona y otrora regante del pueblo). Decía que antes corría de forma permanente, mientras que ahora, sólo queda el polvo. Asimismo, frente a la rudeza de sus palabras serenas, apreciaba el haber decidido quedarse en su rancho, pese a haber tenido razones para irse (dada la ausencia del agua) y oportunidades laborales para emigrar.

Culminando el documental, la autora deja una reflexión abierta, para lo cual enuncia:

“La tierra y el agua, fundamentales para la vida en el desierto, a pesar de ser su derecho constitucional, no les pertenecen legalmente; un silencio histórico hace invisibles sus reclamos”.

Dentro del análisis crítico del discurso, la ideología del documental parece enmarcarse en los atributos de la ruralidad, definiéndola dentro de los aspectos propios de los espacios rurales, así como también de sus transformaciones socioeconómicas y retos. Asimismo, la creencia se enmarca en el poder del arraigo como elemento transformador del territorio, mantenimiento cultural y traspaso hereditario hacia las futuras generaciones.

Bajo esta reflexión, Sosa (2012) señala que:

“La no inclusión histórica de los pobladores en la dinámica del oasis o, por el contrario, la transformación de estos otrora ricos territorios, en ahora desierto, ha perjudicado a los pobladores desde inicios del siglo XX”.

Al final, todo desemboca en el objetivo de la visibilización y sensibilización. Si la sociedad lo entiende, lo hará saber a las autoridades competentes. De esta forma, quizás los territorios olvidados puedan volver a vivir alguna instancia significativa de lo que representó hace décadas su vívido humedal natural, con el fin de que las personas recuperen las identidades perdidas y los espacios vuelvan a patrimonializarse en territorios (Roig, 2007).

Expresiones musicales

El Huayno o Huaiño (DLE, 2022), género bajo el cual los compositores Tejada Gómez y Talquenca (2013) compusieron su obra “Réquiem por Guanacache”, hace resonar armonías y ritmos que recuerdan a las antiguas culturas andinas. Este género musical es característico de la zona peruana, occidente boliviano y el norte de Argentina y Chile (Ajacopa, 2007). Si bien se considera un género precolombino, algunos autores (Montoya, 1996 y Huamán, 2006, citados por Ferrier, 2015) lo ubican como una expresión posterior a la época colonial, la cual llegó a representar la identidad musical de los andinos.

Si bien la esencia de la letra de los Huaynos se vincula esencialmente a aspectos románticos y de cortejo en las comunidades, Tejada Gómez y Talquenca (2013) lo asociaron al lamento comunitario por la pérdida de las antiguas lagunas de Guanacache. La elección del Huayno sobre los géneros típicos de la zona (p. ej., tonadas, gato, cueca cuyana), podría interpretarse como un guiño hacia el vínculo de los antiguos pueblos Huarpes que habitaron la zona de humedales.

A continuación, los versos de la canción citada:

I
*Si los ríos no volvieran
 volvería el arenal
 la culebra de Cienfuegos
 las leguas del secanal
 así ha sido, no volvieron, ni tampoco
 volverán.*

II
*Los ríos muertos
 son peces de arena
 de su silencio comió el arenal
 en Guanacache la pena
 es una pena de arena
 que vela al polvaredal.*

III
*Cuando los ríos no vuelven
 la vida no vuelve más
 el que mata un río mata
 todo lo que va a empezar
 al asesino del río, lo secó la soledad.
 Abran compuertas
 liberen los ríos
 que en Guanacache se mueren de sed
 hagan paisaje al paisaje
 que en el ramaje del aire
 la vida quiere volver.*



YouTube QR



Spotify QR

A través de los versos, la canción expone el avance de la arena sobre los ríos secos, con una sutil exclamación pesimista de que el agua no volverá a fluir en ellos. Asimismo, resalta la muerte de peces que conlleva a una “pena de arena y silencio”. Finalmente, expresa la relación directa de la vida en la zona con la escorrentía fluvial, al tiempo que señala a quienes aguas arriba “matan” al río, exigiéndoles que los liberen de sus represas para calmar la sed y recuperar el paisaje de vida en Guanacache.

Esta canción representa una protesta musical, cuyos versos se relacionan con las versiones de los entrevistados en la filmografía de Valeria Roig, así como con la realidad palpable de la región.

CONCLUSIÓN

Dentro de una relación sociedad – naturaleza de tipo armónica y sustentable, el equilibrio entre ambos factores es fundamental. De esta forma, las comunidades comienzan a patrimonializar el territorio que habitan, coexistiendo de forma sostenible con el entorno natural que posean. El resultado de lo anterior es el equilibrio, donde las sociedades pueden desarrollarse, abastecerse y vincularse culturalmente con su territorio.

Los desequilibrios de este binomio pueden perjudicar a toda la sociedad involucrada o una parte de ella, pero siempre con detrimento del factor naturaleza, cuya degradación dependerá del nivel de desajuste que exista. En este sentido y analizando la situación del sitio Ramsar de estudio, el desajuste proviene del exterior (oasis), para detrimento de las sociedades pequeñas y ecosistemas de humedales aguas abajo.

Dentro de esta relación (en el sitio Ramsar), los descendientes huarpes apenas sobrepasaron los 5.500 habitantes (período 2011 – 2017), con una tasa de crecimiento que, para 2025, hace que no sobrepasen los 7.000 habitantes. Esto, para un territorio de casi un millón de hectáreas, hace que el poblamiento sea insuficiente para hacer que los espacios se conviertan en territorios.

La desarticulación de estos espacios, sumado al detrimento de los antiguos humedales, repercute en el alcance y desarrollo económico de los habitantes del sitio Ramsar. Asimismo, las limitaciones por el acceso al agua para el riego y ganadería impulsan la emigración de jóvenes y el estancamiento económico, favoreciendo así la desterritorialización del lugar.

Por otra parte, la identidad lagunera, herencia de los antepasados huarpes, sigue impregnando a las generaciones que habitan la zona, estimulando el arraigo, la resiliencia y la protesta por mejores condiciones de vida. Bajo este concepto, su cultura ancestral y patrimonial, ligada a los humedales, ha llamado la atención de instituciones públicas y privadas, cuyas acciones han contribuido a que desde el 2010 se construyeran numerosos azudes y obras de remediación para captar el agua de lluvia.

Con la discusión e implementación de nuevas legislaciones (como el proyecto sobre la Ley de Humedales), las acciones a futuro podrían tomar una participación más activa. Asimismo, bajo testimonios de personas nativas e interesados externos en ayudar, existe consciencia acerca de las dificultades de instauración de caudales ambientales desde las fuentes de los ríos aportantes. Esta situación, sumada a los escenarios de cambio climático, obliga a orientar los esfuerzos en otra dirección.

Mientras la atención pública y privada aumente sobre la remediación de humedales y mejoramiento de las condiciones de vida de los habitantes del sitio Ramsar, se podrá lograr la articulación socio-natural del lugar, permitiendo que los espacios vuelvan a convertirse en territorios.

REFERENCIAS

Abraham, R. y Vitarelli, M. (2014). Las Lagunas de Guanacache como espacio de recuperación. Un caso de estudio para la enseñanza del manejo integral de cuencas. Actas Congreso internacional de Geografía. 75º Semana de geografía. Consultado de: https://www.gaea.org.ar/Actas_2014_Abraham.pdf

Ajacopa, T. (2007). Diccionario Bilingüe / Iskay simipi yuyayk'ancha, La Paz p. 134.

Amnistía Internacional. (2022). Ley de Humedales Ya. Amnistía Internacional Argentina. Consultado de: https://amnistia.org.ar/landings/ley-humedales-ya/?Articulo=Humedales&gclid=EAlalQobChmI8K2D9_j99wIVbBXUAR0mCAX4EAAYAiAAEgLSHvD_BwE

Aquabook. (2016). Lagunas de Guanacache: valores hidrológicos, sociales y culturales. Gobierno de la provincia de Mendoza. Consultado de: https://aquabook.agua.gob.ar/456_0

Blanc, G. (s/f). Lagunas de Guanacache. Sitio Ramsar – Mendoza. Consultado de: <http://www.patrimonionatural.com/html/provincias/mendoza/guanacache/descripcion.asp>

Bustos Cara, R. y Martin, C. (2021). Curso de Posgrado: Identidades Locales, Acción Territorial y Dinámicas de Desarrollo. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.

Bustos, R. (s/f). Procesos de valorización territorial en contextos locales. (Teoría de la acción territorial y prácticas de intervención). Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.

Chiavazza, H. y Prieto, M. (2015). El río Desaguadero: corredor cultural en la historia de Cuyo. Restauración de un Sistema Ecológico Compartido. Capítulo 5. Estudio Ambiental del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Universidad de Congreso. Editorial Dunken. Buenos Aires.

Corbat, M. Cahiza, P. García Ilorca, J. y Gil, A. (2015). Explotación de peces en Lagunas de Guanacache. Altos de Melián II. Arcjaepfauna 24 (2015):135-151. Consultado de:

https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/40402/CONICET_Digital_Nro.c5841d17-8d89-472d-9534-cf9fb2aa378d_D.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Diario UNO. (2019). La sequía en las Lagunas de Guanacache, sus consecuencias y los intentos por restaurarlas. Consultado de: https://www.diariouno.com.ar/sociedad/sequia-lagunas-guanacache-consecuencias-intentos-restaurarlas-08302019_rkVWwEHHB

Diccionario de la Lengua Española (2022). Diccionario de la lengua española. Real Academia Española. Consultado de: <https://dle.rae.es/>

El Diario de la República. (2014). Inauguraron los azudes construidos en el río Desaguadero. Consultado de: <https://www.eldiariodelarepublica.com/nota/2014-4-14-15-1-0-inauguraron-los-azudes-construidos-en-el-rio-desaguadero>

Ferrier, C. (2015). El huayno con el arpa: Estilos globales en la nueva música popular andina. Instituto de etnomusicología de la Pontificia Universidad Católica del Perú y Institut français d'études andines, Lima.

Gialdino, I. Ameigeiras, A. Chernobilsky, L. Giménez, V. Mallimaci, F. Mendizábal, N. Neiman, G. Quaranta, G. y Soneira, A. (2006). Estrategias de investigación cualitativa. Editorial Gedisa, S.A. Barcelona, España.

Giménez, G. (2007). Estudios sobre la cultura y las identidades sociales. Colección Intersecciones, Número 18. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. Ciudad de México.

Gordillo, V. (2021). Los humedales de Mendoza, afectados por el cambio climático y el uso del agua en el oasis. Unidiversidad. Sistema de medios de la UNCUYO. Consultado de: <https://www.unidiversidad.com.ar/los-humedales-de-mendoza-afectados-por-el-cambio-climatico-y-el-uso-del-agua-en-el-oasis>

Gordillo, V. (2021b). Ley de humedales: “Mendoza les quitó el derecho al agua a las comunidades que viven fuera del oasis”. Unidiversidad. Sistema de medios de la UNCUYO. Consultado de: <https://www.unidiversidad.com.ar/ley-de-humedales-mendoza-le-quito-el-derecho-al-agua-a-las-comunidades-que-viven-fuera-del-oasis>

H. Cámara de Diputados de la Nación. (2020). Proyecto de Ley. Régimen de presupuestos mínimos para la protección ambiental de los humedales. República Argentina. Consultado de: <https://www4.hcdn.gob.ar/dependencias/dsecretaria/Periodo2020/PDF2020/TP2020/3819-D-2020.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2001). Censo 2001. República Argentina. Consultado de: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-134>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2010). Censo 2010. República Argentina. Consultado de: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2015). Estimaciones de población por sexo, departamento y año calendario 2010 – 2025. N° 38 Serie análisis demográfico. República Argentina. Consultado de: https://sitioanterior.indec.gob.ar/ftp/cuadros/poblacion/proyeccion_departamentos_10_25.pdf

Lorda, A. y Kraser, M. (2021). Territorios que “sienten”. Relación sociedad-naturaleza desde la complejidad. Universidad Nacional del Sur. Departamento de Geografía y Turismo. Bahía Blanca, Argentina.

Los Andes (2017). San Miguel: histórico sitio cuyano en Lavalle. Artículo periodístico digital. Consultado de: <https://www.losandes.com.ar/san-miguel-pasado-y-presente-de-la-mendoza-huarpe-en-lavalle/>

Los Andes (2017b). El Retamo. Artículo periodístico digital. Consultado de: <http://www.losandes.com.ar/noticia/cultura-436767>

Manzur, G. (2007). Guanacache: Las aguas de la sed. Fund. Maraño. Consultado de: <http://semioweb.msh-paris.fr/AAR/772/Resumen-Guanacache-def.pdf>

Minervini, A. y López, M. (2012). Lagunas del Desierto. El valor de la naturaleza oculto en la identidad de su gente. Manual educativo ambiental de las lagunas de Guanacache, del Desaguadero y del Bebedero. Editorial APN. ISBN: 978-987-1363-21-6. Consultado de: https://sib.gob.ar/archivos/Manual_Lagunas_del_Desierto.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Lagunas de Guanacache, Desaguadero y Del Bebedero (Mendoza, San Juan, San Luis y APN). Gobierno de la República Argentina. Consultado de: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/agua/humedales/sitiosramsar/guanache-desaguadero-delbebedero>

Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, OCHA. (2021). Sequía castiga a comunidades y agricultores de los Andes argentinos. Consultado de: <https://reliefweb.int/report/argentina/sequ-castiga-comunidades-y-agricultores-de-los-andes-argentinos>

Pellegrinuzzi, A. (2021). Hubo acuerdo: las Lagunas de Guanacache se remediarán como en Mendoza y San Luis. Diario Huarpe. Consultado de: <https://www.diariohuarpe.com/nota/hubo-acuerdo-las-lagunas-de-guanacache-se-remediaran-como-en-mendoza-y-san-luis-20214277420>

Prensa Gobierno de Mendoza. (2015). Restauración Ambiental de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Gobierno de la Provincia de Mendoza. Consultado de: <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/restauracion-ambiental-de-guanacache-desaguadero-y-del-bebedero/>

Prensa Ministerio De Desarrollo Humano y Promoción Social. (2020). Desarrollo Humano abordó a familias huarpes en las Lagunas de Guanacache. Gobierno de la Provincia de San Juan. Consultado de: <https://sisanjuan.gob.ar/desarrollo-humano-y-promocion-social/2020-01-26/19922-desarrollo-humano-abordo-a-familias-huarpes-en-las-lagunas-de-guanacache>

Prensa Secretaría De Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2022). Auditadas por Ambiente, finalizaron las obras de remediación en las Lagunas de Guanacache. Gobierno de la Provincia de San Juan. Consultado de: <https://sisanjuan.gob.ar/ambiente-y-desarrollo-sustentable/2022-02-06/38550-auditadas-por-ambiente-finalizaron-las-obras-de-remediacion-en-las-lagunas-de-guanacache>

Pueblos Originarios. (s/f). Huarpe. Consultado de: <https://pueblosoriginarios.com/sur/andina/huarpe/huarpe.html>

Ramsar. (2015). La Convención de Ramsar: ¿de qué trata?. Ficha Informativa N° 6. Convención sobre los Humedales. Consultado de: https://www.ramsar.org/sites/default/files/fs_6_ramsar_convention_sp_0.pdf

Real Academia Española, RAE. (2021). Diccionario de la Lengua Española. Consultado de: <https://dle.rae.es>

Roig, V. (2007). Huanacache, retratos en el desierto. Documental histórico basado en entrevistas. Fondo Provincial de la Cultura del Gobierno de Mendoza. Secretaría de Cultura y Turismo. Consultado de: https://www.youtube.com/watch?v=jxHyoapiGDM&ab_channel=ValeriaRoig

Roig, V. (2019). Los Andes Azules de Fidel. El Anartista. Consultado de: <https://elanartista.com.ar/2019/08/29/los-andes-azules-fidel/>

Sosa, H. y Vallvé, S. (1999). Lagunas de Guanacache (centro-oeste de Argentina). Procedimiento de inclusión a la convención sobre los humedales (Ramsar, 71). *Multequina* 8: 71-85, 1999. ISSN 0327-9375. Consultado de: https://www.mendoza.conicet.gov.ar/porta/multequina/indice/pdf/08/8_5.pdf

Sosa, H. (2012). Restauración y conservación del Sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. *Wetlands International*. Consultado de: https://aquabook.irrigacion.gov.ar/files/upload/contenidos/10_2/LagunasdeGuanacache.pdf

Tejada Gómez, A. y Talquenca, D. (2013). Requiem por Guanacache [Canción]. En *Tonada Larga Para El País Del Sol (Cantata Mendocina)*. Epsa Music. <https://open.spotify.com/track/1bDuV6cwEIT2n5ns4Sfzx6>

Torres, L. y Pastor, G. (2015). Territorios compartidos, actores, procesos y paisajes culturales a las orillas del Desaguadero. Restauración de un Sistema Ecológico Compartido. Capítulo 6. Estudio Ambiental del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Universidad de Congreso. Editorial Dunken. Buenos Aires.

Van Dijk, Teun A. (2002). El análisis crítico del discurso y el pensamiento social. *Athenea Digital*, n°, primavera 2002. Pp: 18-24.

ViaPaís. (2020). Lagunas de Guanacache: la espera de un pueblo originario que se hace eterna. *Noticias de San Juan*. Consultado de: <https://viapais.com.ar/san-juan/2040224-lagunas-de-guanacache-la-espera-de-un-pueblo-originario-que-se-hace-eterna/>

Vignati, M. (1953). Un diario de viaje por las lagunas de Guanacache en el año 1789. Notas del museo de Eva Perón. Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional Eva Perón. *Revista Antropología* N° 57.

Wetlands International LAC. (2014). Conservación y Restauración de los lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero en Argentina. Consultado de: <https://lac.wetlands.org/noticia/conservacion-restauracion-los-lagunas-guanacache-desaguadero-del-bebedero-argentina/#:~:text=En%20la%20actualidad%20las%20lagunas.de%20la%20cr%C3%ADa%20de%20cabras.>

Wetlands International LAC. (2017). Cómo logramos restaurar los humedales de Guanacache en alianza con el sector empresarial. Consultado de: <https://lac.wetlands.org/noticia/logramos-restaurar-los-humedales-guanacache-alianza-sector-empresarial/>

Wetlands International LAC. (2021). Tras nueve años de trabajo junto a las comunidades, volvió el verde a los humedales de Guanacache, en Mendoza. Consultado de: <https://lac.wetlands.org/noticia/volvio-el-verde-a-los-humedales-de-guanacache-en-mendoza/>

Capítulo III

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

INTRODUCCIÓN

La región cuyana, característica de climas áridos y semiáridos, es concordante con la diagonal árida sudamericana, que se encuentra desde la costa árida del Perú hasta la Patagonia argentina (Bruniard, 1982; Lauro, 2016; Albiol, 2018). Las características áridas de la zona se generan principalmente debido al efecto orográfico de los Andes, el cual actúa como una barrera natural de los vientos del oeste, ocasionando que los mismos produzcan precipitaciones en la vertiente pacífica, dejando a la vertiente atlántica andina desprovista de lluvias abundantes (Capitanelli, 1967; Bruniard, 1982; Albiol, 2014; Lauro, 2016; Rivera y Penalba, 2017; Albiol, 2018; Rivera et al., 2019). La región de estudio se localiza a 170 km del océano Pacífico, mientras que dista más de 1.000 km del océano Atlántico. Debido a que la cordillera de los Andes bloquea la mayoría de los sistemas sinópticos característicos del océano Pacífico, el clima del lugar es afectado principalmente por la acción del anticiclón subtropical semipermanente del Atlántico (Albiol, 2014).

La mayor parte de las escasas precipitaciones de la región decrecen de este a oeste, presentando mínimos valores cerca de los Andes. Por otro lado, el efecto cordillerano se conjuga con la cercanía al Pacífico, jugando un papel importante en el clima de alta montaña, con las intensas nevadas del invierno y por la ocurrencia del viento Zonda (Föhn) en la vertiente de sotavento de los Andes (Bruniard, 1982; Albiol, 2014; Lauro, 2016; Rivera y Penalba, 2017; Albiol, 2018). Capitanelli (1967) y Albiol (2014, 2018) expresan que, dado que la mayor parte de las precipitaciones en la región ocurren durante el verano, las mismas son producidas principalmente por frentes fríos y líneas de inestabilidad, presentando una menor frecuencia de sistemas de origen orográfico. Por su parte, Albiol (2014, 2018) indica que la precipitación media es de 221 mm en la estación del aeródromo de Mendoza (período 1970 – 2010), con un déficit pluviométrico permanente y gran variabilidad interanual, presentando precipitaciones heterogéneas en tiempo y espacio, con máximos y mínimos acumulados durante el verano e invierno, respectivamente (Compagnucci, 1988).

Las temperaturas, propias de una región continental del hemisferio sur, presentan máximas en enero y mínimas en julio. Estas tienden a ser menores conforme se aumenta en altitud y latitud, generando un gradiente negativo de norte a sur y de este a oeste (Lauro, 2016). El paisaje de planicies cuyanas corresponde a climas áridos y semiáridos, encontrándose dentro de la zona templada argentina, de gran dinamismo atmosférico (Capitanelli, 1967; Albiol, 2018; Camisay et al., 2020).

Norte (1996), en su “Mapa climático de Mendoza”, expresa que la mayor parte del área está dominada por un clima desértico de tipo B (Köppen). El autor señala

que las zonas del noreste mendocino (y sureste sanjuanino), reciben menores precipitaciones en el año y con mayor frecuencia en verano. También expresa que la zona de mayor precipitación corresponde al extremo oeste, ubicándose sobre alta montaña y en forma de nieve, durante el invierno. En todo caso, Albiol (2018) reitera que la región posee déficit pluviométrico permanente y elevadas amplitudes térmicas anuales, así como también escasa humedad del aire y fuerte evaporación.

Los trabajos citados no presentan una caracterización climática espacial y temporal reciente de la zona, por lo tanto, el presente capítulo se enfoca en definir las características climáticas del área con series de tiempo más largas para actualizar los conocimientos del clima de la región. Ello tiene como finalidad comprender las potencialidades o debilidades actuales que presenta la zona de estudio, sobre todo frente a las actividades humanas que inciden directamente sobre la salud de los ecosistemas lacustres de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. El objetivo general de este capítulo es examinar las condiciones climáticas imperantes en la región de estudio, mediante análisis temporales y espaciales de la precipitación y temperatura media. Además, se pretende comprobar los supuestos estadísticos subyacentes de las series temporales empleadas, establecer el régimen climático de acuerdo con la manifestación temporal de la precipitación y temperatura y finalmente categorizar los tipos de clima que se presentan espacialmente en la zona de estudio.

METODOLOGÍA

Se utilizaron datos mensuales de temperatura y precipitación pertenecientes a cuatro fuentes de información oficial: Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2019), Base de Datos Hidrológica Integrada (SIPHN, 2019), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2019) e Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA, 2019). El método de trabajo se basa en tres puntos fundamentales: (1) análisis exploratorio de datos, (2) caracterización climática temporal y (3) caracterización climática espacial.

Helsel y Hirsch (2002) expresan que para analizar un conjunto de datos la primera consideración es conocer las características implícitas de los mismos. Por lo tanto, se realizó un análisis exploratorio utilizando técnicas estadísticas estándar, incluyendo medidas de: variabilidad, posición, simetría, valores extremos, entre otras.

Dada la heterogeneidad que presentan las longitudes de las series de tiempo se escogió el período comprendido entre 1993 y 2014 ($n = 22$ años), por ser el lapso temporal que tenía mayor representatividad entre la mayoría de las estaciones. Adicionalmente, se aplicó como criterio estándar, utilizar aquellas estaciones que presentaran un valor menor o igual al 10 % de datos faltantes, para los cuales se utilizaron las metodologías que se describen a continuación.

Precipitación

A efectos de identificar las estaciones piloto o de referencia, sobre las cuales se calculan los datos faltantes de una estación problema, se utilizó un análisis de conglomerados (*cluster*) mediante el software R 3.6.0 - paquete “factoextra” (Kassambara, 2017). A través de este software se determinó el número de conglomerados óptimo mediante los métodos de Elbow y Silhouette (Najundan et al., 2019) con base en los valores medios de temperatura y precipitación versus altitud. Los conglomerados resultantes fueron contrastados y/o corregidos (para que tengan consistencia geográfica), de acuerdo con el mapa de precipitación y temperatura media presentado por Cravero *et al.*, (2017). Teniendo los grupos definidos, se estableció la diferencia entre estaciones por grupo, considerando un umbral del 10 % mediante la ecuación [3.1]:

$$Diferencia (\%) = \left| \frac{N_{est.problema} - N_{est.piloto}}{N_{est.problema}} \right| * 100 \quad [3.1]$$

Donde, $N_{est.problema}$ (estación problema) y $N_{est.piloto}$ (estación piloto) representan el valor medio de la serie (1993 – 2014) para la estación problema y piloto(s) respectivamente.

Se utilizó la ecuación de la diferencia (%) [3.1] en vez del coeficiente de correlación de Pearson (r), dado que la primera representa más acertadamente la similitud real entre las series de una estación problema determinada y su(s) piloto(s) respectivamente, evocando de esta manera la correlación espacial de cada estación. El coeficiente r puede ser representativo para denotar estructura más no similitud.

Estableciendo una jerarquía de semejanza (menor diferencia) entre cada estación problema y sus pilotos correspondientes, se calcularon los datos faltantes de acuerdo con las tres primeras posiciones jerárquicas en función de la ecuación de razón de los valores normales o de proporción normal con estaciones adyacentes [3.2]. Este utiliza la razón de los valores normales de tres estaciones próximas alrededor de la estación cuyo dato se desea calcular (Paulhus y Kohler, 1952; Duque, 1980, Guevara, 2003; Zarei et al., 2019):

$$X_j = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{\bar{X}}{\bar{A}} A_j \right) + \left(\frac{\bar{X}}{\bar{B}} B_j \right) + \left(\frac{\bar{X}}{\bar{C}} C_j \right) \right] \quad [3.2]$$

Donde, X_j : dato a estimar en la estación problema X ; \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} y \bar{X} son las precipitaciones medias normales en las estaciones jerárquicas A , B , C (pilotos) y X (problema); A_j , B_j y C_j : datos de lluvia en la misma posición cronológica que X_j .

Cuando la diferencia entre las estaciones piloto y la estación problema considerada fuese menor al 10 %, Guevara (2003) recomienda utilizar la ecuación [3.3]:

$$X_j = \frac{1}{3} * (A_j + B_j + C_j) \quad [3.3]$$

Donde, X_j : dato a estimar en la estación problema X ; A_j , B_j y C_j : datos de lluvia en la misma posición cronológica que X_j .

En los casos en que un mes con dato faltante no tuviese pares con datos existentes en estaciones piloto, la sumatoria de ese año se considera vacío. Para estos casos, se utilizó una modificación [3.4] realizada sobre la base de la ecuación dada por Duque (1985, citada por Naranjo y Duque, 2004), en la que utilizaban la ecuación de la recta (regresión lineal simple) para calcular los datos faltantes de la estación problema en función de la estación patrón.

Para este caso [3.4], se utiliza sólo la pendiente de la recta generada [3.5], para luego ser multiplicada por el promedio entre el valor anterior y posterior al dato faltante anual.

$$X_i = \frac{(X_{i-1} + X_{i+1})}{2} * A_{pend} \quad [3.4]$$

Donde, X_i : dato anual faltante; A_{pend} : valor de pendiente de la estación piloto con mayor correlación lineal (Pearson).

$$A_{pend} = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2} \quad [3.5]$$

Donde, $X = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (est. patrón)$; $y = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (est. problema)$

La estación patrón es la suma acumulada de las estaciones piloto previamente determinadas por el método de conglomerados.

Temperatura

Se procedió al cálculo de los datos faltantes, utilizando una modificación [3.6] (Bastidas et al., 2020) efectuada sobre la ecuación de razón normal sin estaciones adyacentes (Duque, 1980), siendo similar a la ecuación [3.2], por lo que no fue necesario agrupar las estaciones mediante conglomerados.

$$X_i = \left(\frac{TA_{i-1} + TA_{i+1}}{2} \right) \div \left(\frac{TMA}{TMM_i} \right) \quad [3.6]$$

Donde, X_i : dato faltante mensual de temperatura; TA_{i-1} ; TA_{i+1} : temperatura anual media anterior y posterior al año problema; TMA: temperatura media anual de la serie de datos; TMM_i : temperatura media mensual del mes problema.

La ecuación [3.6] no considera estaciones adyacentes a la del dato faltante, sino que utiliza los valores medios (mensuales y anuales) de la propia estación.

Validación de metodologías usadas en la incorporación de datos faltantes

La validación se realizó mediante la estimación del error cuadrático medio estándar NRMSE [3.7] (Castaneda-González et al., 2018) y del índice modificado de similitud estructural mSSIM [3.8] (Mo et al., 2013a, 2013b. Bastidas et al., 2021).

$$NRMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum(X_i - Y_i)^2}{n}} \div \bar{X} \times 100 \quad [3.7]$$

Donde, $NRMSE$ (%): error cuadrático medio normalizado; X_i : valor observado; Y_i : valor calculado; \bar{X} : promedio de los valores observados.

$$mSSIM = \left(\frac{2\tilde{x}\tilde{y}}{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2} \right) \left(\frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \right) \left(\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y} \right) \quad [3.8]$$

Donde, $(\tilde{x}, \tilde{y}) = (\bar{x}, \bar{y}) - \Psi_{xy}$; $\Psi_{xy} = \min(x_i, y_i | i = 1, 2 \dots N)$; x : valor observado; y : valor calculado.

En cuanto al mSSIM, los tres productos (de izquierda a derecha) hacen alusión a medidas de: media, varianza y correlación, por lo que el índice referido, además de tener potencialidad para indicar similitud en cuanto a patrones o estructura, también lo hace en cuanto a cercanía entre dos objetos o series de datos.

Para la modificación realizada sobre la temperatura [3.6], se utilizó (además del NRMSE y del mSSIM) una prueba t de Student para verificar que no existiera tendencia en los residuos del coeficiente $\left(\frac{TMA}{TMM_i} \right)$.

Detección de valores extremos y atípicos

Su presencia puede ocurrir a consecuencia de errores producidos por instrumentación, medición o metodologías empleadas, o bien por la ocurrencia de anomalías climáticas. Su identificación es importante para verificar y analizar su causalidad, o en caso contrario, considerar eliminarlos de la serie. Aplicando lo mencionado, es posible evitar algunas distorsiones estadísticas, dada la ausencia de su representatividad (Lauro, 2016).

Comúnmente, se utiliza la prueba de Grubbs (Lauro, 2016) para identificar los valores atípicos o extremos. No obstante, Leys et al. (2013) y Bae y Ji (2019) sugieren utilizar el método MAD-score (*median absolute deviation* – desviación absoluta de la mediana) como estimador robusto de la dispersión de los datos desde la mediana muestral. Luego de su popularización en 1974 y con atributos de ideas de Gauss (s.XVIII – XIX), se convirtió en una alternativa para detectar valores atípicos (*outliers*) o fuera de rango. Con el uso de la mediana en vez de la media, se obtienen ventajas ante la sensibilidad de la primera en presencia de

outliers, resultando tener mejores resultados para su uso que otras metodologías, como el rango intercuartílico (Bastidas et al., 2020b).

Derivado de Leys et al. (2013) y Bae y Ji (2019), las ecuaciones se expresan como:

$$\sigma_{med} = |x_i - med[X_j]| \quad [3.9]$$

$$MAD = \frac{med(\sigma_{med})}{0,6745} \quad [3.10]$$

$$\text{Criterio: } \{med[X_j] - (2,5 * MAD)\} < x_i < \{med[X_j] + (2,5 * MAD)\} \quad [3.11]$$

Donde, σ_{med} : desviación de cada valor de la serie x_i ($i = 1, \dots, n$) con respecto a la mediana (med) de la serie de datos $[X_j]$.

MAD : desviación absoluta de la mediana; 0,6745: constante referido al cuantil 75 de la distribución normal estándar.

En el criterio de decisión, la constante 2,5 expresa la medida de robustez del método. Miller (1991) los categoriza en tres tipos: 2: poco conservador; 2,5: moderadamente conservador y 3: muy conservador. Por su parte, Leys et al., (2013) recomiendan el criterio de 2,5, aunque el mismo pueda variar de acuerdo con las necesidades de la investigación. Luego de la identificación de los posibles *outliers* encontrados, cada uno debe analizarse en el contexto espacial (por los conglomerados formados) o por la cercanía con otras estaciones, así como también por el momento de ocurrencia de cada valor atípico. De esta forma, si al momento de aparición de un *outlier*, este coincide con otros en el mismo período, o en su defecto, con aumentos o disminuciones importantes de la magnitud de la variable en el mismo momento, el mismo podrá ser verificado, de lo contrario, puede eliminarse de la serie.

Para casos excepcionales donde la primera condición no se cumpla, se puede recurrir a registros históricos (principalmente de tipo hemerográficos) para intentar constatar la veracidad de estos).

Variabilidad anual y mensual

La variabilidad es una medida que evidencia la dispersión de una serie de datos. Arachchige et al. (2019) establecen que, aunque es común usar el coeficiente de variación CV ($CV = \sigma/\bar{X}$) (desviación estándar sobre el promedio aritmético muestral), esta medida es muy sensible a la presencia de valores fuera de rango (debido al sesgo que genera sobre sus parámetros). Los mencionados autores sugieren utilizar un método similar y alternativo al CV , el cual resulte tener menos sensibilidad frente a la presencia de *outliers*. Dicho método, al igual que en el

apartado anterior (detección de valores extremos y atípicos), utiliza el MAD-score (*median absolute deviation*) en sustitución de la desviación estándar y la mediana de los datos por la media aritmética.

La ecuación que sugieren se presenta como:

$$RCVm = 1,4825 * \frac{MAD}{med(Xj)} \quad [3.12]$$

Donde, $RCVm$: coeficiente de variación robusto por MAD (*robust coefficient of variation by MAD*). La constante 1,4825 denota $1/Q75$ de $N(0,1)$.

MAD : desviación absoluta de la mediana (ver ecuación [3.10] anterior); $med(Xj)$: mediana de la serie de datos.

Dada su similitud con el coeficiente de variación, se tomó el rango de clasificación del $RCVm$ como: bajo ($RCVm < 20$), moderado ($20 < RCVm < 30$) y alto ($RCVm > 30$) (Hare, 2003, citado por Asfaw et al., 2018). La ecuación $RCVm$ se aplicó para obtener la variabilidad anual (filas) y mensual (columnas), como si se tratase de una matriz $m \times n$ de datos mensuales, con m = años y n = meses.

Además de la robustez de la ecuación frente a *outliers*, la misma tiene la limitación $med(Xj) > 0$, lo cual implica que, para las precipitaciones, en estaciones con varios meses registrando 0 mm, la mediana de estos tendría el mismo valor, resultando en una indeterminación de la ecuación. Por tanto, la misma tendría más validez en climas más húmedos y casi sin mayores inconvenientes para series de temperatura (dado que esta es una variable continua).

Para los casos en los que un $RCVm$ resulte indeterminado, dicho faltante puede corroborarse con sus vecinos temporales (meses anteriores o posteriores) o bien, con el CV de los datos (cuya única posibilidad de indeterminación es que todos los meses considerados sean iguales a cero).

También dentro de la variabilidad, puede considerarse un estimador que explique la forma en que las lluvias se concentran o varían en el tiempo. En este sentido, el *índice de concentración de precipitación PCI* (*precipitation concentration index* por sus siglas en inglés), es estimador no paramétrico robusto frente a la ausencia de normalidad, *outliers* y datos faltantes (Asfaw et al., 2018).

La ecuación del PCI (Oliver, 1980 y De Luis et al., 2011, citados por Asfaw et al., 2018) se presenta como:

$$PCI_x = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} P_i)^2} \times 100 \quad [3.13]$$

Donde, PCI_x : índice de concentración de precipitación; P_i : lluvias en el mes i .

Este índice puede aplicarse para examinar la variabilidad en diferentes escalas, como anual o estacional (mensual promedio). De acuerdo con Oliver (1980, citado por Asfaw et al., 2018), los rangos indicativos del PCI se encuentran como: baja ($PCI < 10$), moderada ($11 < PCI < 15$), alta ($16 < PCI < 20$) y muy alta ($PCI > 21$).

Aleatoriedad

Lauro (2016) sugiere la utilización de la prueba de Kendall, la cual permite verificar la aleatoriedad de una muestra de datos. En función de puntos de inflexión determinados (observaciones superiores a las adyacentes y menores a las anteriores), se permite establecer el número de dichas inflexiones Q y contrastarlo mediante un estadístico I_i y criterio de rechazo C .

Estadístico de contraste:

$$I_i = \begin{cases} 1 \text{ si } X_i > X_{i-1} \text{ y } X_i > X_{i+1} \\ -1 \text{ si } X_i < X_{i-1} \text{ y } X_i < X_{i+1} \\ 0 \end{cases} \quad \forall i = 2 \dots N - 1 \quad [3.14]$$

Asimismo, la contabilidad de puntos de inflexión se determina por:

$$Q = \sum_{i=2}^{N-1} |I_i| \quad [3.15]$$

Por su parte, el contraste viene dado por el estadístico:

$$C = \frac{Q - \frac{2N-4}{3}}{\sqrt{\frac{16N-29}{90}}} \quad [3.16]$$

Donde, X_i : observación en el rango i ; Q : número de puntos de inflexión. C : criterio de rechazo, distribuido con $N(0,1)$ y comparado con el cuantil $Z_{1-\alpha}$ de la distribución normal estándar. Si $C > Z_{1-\alpha}$ ($\alpha = 0,05$), las observaciones provienen significativamente de una población aleatoria (H_0) en vez de una con algún grado de determinismo (H_1).

Independencia

Lauro (2016) y Bugrayhan y Kahya (2019) exponen la versatilidad de la prueba no paramétrica de Von Neumann (Von Neumann, 1941) para determinar la independencia serial de los datos. Las ecuaciones siguientes denotan el estadístico de contraste R y el estandarizado C , respectivamente:

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^{N-1} (X_{i+1} - X_i)^2}{(N-1) \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad [3.17]$$

$$C = \frac{R - \frac{N}{N-1}}{\sqrt{\frac{4(N-2)}{(N-1)^2}}} \quad [3.18]$$

Ya que $C \sim N(0,1)$, si $|C| > Z_{(1-\alpha/2)}$, se rechazaría la hipótesis (H_0) de que los datos sean independientes.

Homogeneidad

La prueba no paramétrica propuesta por Pettitt (1979) permite detectar puntos de quiebre o cambios en las series temporales contrastadas, lo cual indicaría la falta de homogeneidad en las mismas (H_1) (Li et al., 2019). Dichos cambios se contabilizan sin conocer su posición exacta en las series (Bugrayhan y Kahya, 2019). Por su parte, Lauro (2016) indica que se trata de una prueba robusta, basada en la de Wilcoxon-Mann-Withney (Jamieson, 2004; Carifio y Perla, 2008). Adicionalmente, autores como Kundzewicz y Robson (2004, citados por Lauro, 2016), lo consideran “...como una de las pruebas más robustas para la identificación de cambios en series cronológicas”.

El estadístico de contraste se expresa como:

$$T_s = \max_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad [3.19]$$

Donde,

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{signo}(X_i - X_j) \quad [3.20]$$

$$\text{signo} = 1 \forall X_i > 0; 0 \forall X_i = 0; -1 \forall X_i < 0 \quad [3.21]$$

El criterio de rechazo o aceptación de H_0 se establece si el nivel de significancia α :

$$\alpha > e^{\frac{-6K_T^2}{N^2+N^3}} \quad [3.22]$$

Cuando el máximo de K_T ocurre, el punto de quiebre se estima como t . Teniendo para K_T :

$$K_T = \max \left| \frac{U_{t,N}}{\sqrt{Nt-t^2}} \right| \quad \forall t = 1 \dots N \quad [3.23]$$

El cálculo de la prueba de Pettitt (1979), se realizó a través del software XLSTAT (Addinsoft, 2016), el cual utilizó 10.000 simulaciones Monte Carlo para calcular el valor-p al 99 % de confiabilidad.

Tendencia

Los cambios graduales en las series temporales fueron contrastados mediante la prueba de Mann-Kendall (Hirsch et al., 1982; Westmacott y Burn, 1997, citados

por Lauro, 2016). Esta prueba, propuesta originalmente por Mann en 1945 y estudiada más tarde por Kendall en 1975, se deriva de una prueba de correlación por rangos de dos grupos de observaciones. En esta, se toma en cuenta la correlación entre el orden del rango de datos observados y el orden en el que ocurren. El contraste de hipótesis indica que H_0 se relaciona con los datos que sean independientes y aleatorios, es decir, que no presenten una tendencia o estructura de correlación serial entre estos (Lauro, 2016).

Esta prueba es reconocida y usada ampliamente para evaluar las tendencias en distintas variables temporales, como precipitación u otras de índole climática (De Luis et al., 2010). Asimismo, la prueba de Mann-Kendall (MK) tiene la ventaja de no asumir ningún supuesto subyacente de los datos utilizados (Serrano et al., 1999, citado por González-Hidalgo et al., 2010), por tanto, su uso es ampliamente recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (González-Hidalgo et al., 2010).

Lauro (2016) y Li et al. (2019) establecen que el estadístico de contraste es:

$$S = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=k+1}^N \text{signo}(x - x_k) \quad [3.24]$$

Donde,

$$\text{signo} = 1 \forall X_i > 0; 0 \forall X_i = 0; -1 \forall X_i < 0$$

$$x_i: i = (1 \dots n)$$

Presentándose la situación de H_0 , Lauro (2016) señala que la distribución de S es asintóticamente normal con media cero y varianza igual a:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad [3.25]$$

Donde, n : número de observaciones; q : número de grupos de datos repetidos; t_p : número de repeticiones en un grupo. El signo de S representa la orientación de la tendencia, (+): creciente y (-): decreciente.

Los estadísticos de contraste se expresan de acuerdo con el signo de S :

$$\text{Si } S > 0 \quad Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} \quad [3.26]$$

$$\text{Si } S < 0 \quad Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} \quad [3.27]$$

$$\text{Si } S = 0 \quad Z = 0 \quad [3.28]$$

Estando $S \sim N(0, \text{VAR}[S])$, el valor del estadístico puede asociarse al de una variable normal estandarizada Z . Con $\alpha = 0,05$, H_0 puede ser rechazada si $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$

Esta prueba fue calculada mediante el software XLSTAT (Addinsoft, 2016), el cual también arrojó el valor de la pendiente de Sen. Dicha pendiente se conforma como una prueba no paramétrica, utilizada para evaluar las magnitudes de las pendientes de una serie temporal determinada (Wanderson et al., 2018). Dada su insensibilidad a la presencia de *outliers* y datos faltantes, Gómez y Ochoa (2011) indican que se debe a que elimina el régimen estacional de la serie mediante el uso de la mediana de Q_i (Sen, 1968; Kahya y Kalay, 2004, citados por Gómez y Ochoa, 2011):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad [3.29]$$

Donde, $i = 1 \dots N$; x_j y x_k : datos en los tiempos j y k ($j > k$) respectivamente; $med(Q_i)$: pendiente de Sen.

Por su parte, Wanderson et al. (2018) reiteran su robustez por encima de la pendiente de la recta de regresión común, significando de esta forma una medida más realista de las tendencias de series temporales.

Caracterización climática temporal

Para la caracterización de las series de tiempo, se utilizaron herramientas gráficas. Estas permiten identificar y visualizar los principales aspectos de estructura, patrones y tendencia, los cuales pueden ser usados para presentar resultados (Clifford et al., 2010). De Jesús (2014) explica que, con estas representaciones, se busca transmitir información de forma eficiente (rápida, directa y comprensible), de forma que faciliten análisis posteriores.

Entre la variedad de gráficos utilizados, se encuentran: histogramas de frecuencias (absolutas, relativas y acumulativas), diagramas de dispersión, gráfico de series temporales (XY), diagramas de retícula polar y diagramas ombrotérmicos (climogramas). Clifford et al. (2010) señalan que los principales propósitos de las representaciones gráficas resultan ser: exploración preliminar de patrones, verificación de calidad y otros supuestos estadísticos y la función comunicadora al público a quien va dirigido. Confeccionadas adecuadamente, estas herramientas resultan de gran valor para la geografía y la ciencia en general.

Caracterización climática espacial

Mediante la visualización de regímenes climáticos (generalmente basados en temperatura y precipitación), se determina el patrón de comportamiento medio de las características climáticas de un lugar en un momento o período determinado. De Jesús (2014) establece que las clasificaciones climáticas tienen como objetivo central establecer un orden en la diversidad de características climáticas existentes. Para ello, se hace uso de límites climáticos, índices y

algoritmos para realizar clasificaciones, con el fin de tener un mayor entendimiento del comportamiento y características de las condiciones climáticas medias del lugar. Dado que existen varios sistemas de clasificación climática, algunos de los más tradicionales, como Köppen, Thornthwaite y Holdridge son los más ampliamente utilizados incluso en la actualidad (Spinoni et al., 2014).

Luego de haber completado los datos faltantes en las series mensuales de temperatura y precipitación para el período 1993 – 2014, se ejecutó una interpolación basada en el método IDW (ponderación de distancia inversa) (Zhang et al., 2019) usando el software QGIS 2.18.14, mediante el cual se produjeron dos imágenes ráster de temperatura y precipitación respectivamente (tamaño de píxel: 200 x 200 m). Villatoro et al., (2008) señalan que cuando el distanciamiento es muy grande (como el caso de estudio), el método de interpolación de Kriging Universal presenta problemas para la obtención de los variogramas, por lo que, comparativamente, el método IDW se perfila como mejor opción.

A partir de dichas imágenes ráster (Figuras 3.15 y 3.16), y teniendo cada píxel un valor de temperatura y precipitación media, se contrastaron con límites y clasificaciones climáticas. A continuación, se detallan los diferentes índices que se utilizaron en esta investigación.

Índice termo-pluviométrico de Lang (1920)

Lang (1920, citado por Ghalem et al., 2018) lo define como un índice de aridez, que establece el cociente entre la precipitación y temperatura media del período en cuestión (Al-Zamili y Al-Lami, 2018, Borovic et al., 2019). Adicionalmente, expresa las condiciones de irrigación natural del paisaje (Tabla 3.1) con relación a las lluvias y las temperaturas (Sobisek, 1993 y Dufkova y Toman, 2004, citado por Chowdhury, 2018). La escala de este índice puede generalizar la diferenciación climática en zonas áridas y semiáridas.

$$IL = \frac{P}{T} \quad [3.30]$$

Donde,

IL: índice de Lang (sin unidad de medida específica); P: precipitación media anual (mm); T: temperatura media anual (°C).

Tabla 3. 1. Clasificación de Lang (Neira, 2010)

Zonas climáticas	IL
Perhúmeda	> 160
Húmeda de grandes bosques	100 – 160
Húmeda de bosques claros	60 – 100
Húmeda de estepas y sabanas	40 – 60
Semiárida	20 – 40
Árida	< 20

Índice de aridez de Emmanuel De Martonne (1923)

Si bien fue propuesto en 1923 (De Martonne, 1923, citado por Chowdhury, 2018), es considerado aún uno de los indicadores bioclimáticos más importantes y más ampliamente usados en climatología (Al-Zamili y Al-Lami, 2018; Maggi et al., 2018; Radakovic et al., 2018; Ioan et al., 2019). Está basado, al igual que el índice de Lang, en el cociente entre la precipitación y la temperatura media anual (+ 10 para este último), aunque también posee una variante para valores mensuales. De acuerdo con Martinovska et al., (2019), este índice permite determinar la zona climática e indicar estados de aridez (Tabla 3.2) vinculados a rendimientos de cultivos.

$$IA = \left(\frac{P}{T+10} \right) \quad [3.31]$$

Donde,

IA: índice de aridez de E. De Martonne; P: precipitación media anual (mm); T: temperatura media anual (°C).

Tabla 3. 2. Clasificación de De Martonne (Haider y Adnan, 2014).

Zonas climáticas	IA
Húmedo	> 30
Subhúmedo	20 – 30
Semiárido	10 – 20
Árido	5 – 10
Muy árido	< 5

Clasificación climática de Köppen - Geiger

Siendo más elaborada que los índices y límites anteriores, esta clasificación se basa en variaciones de temperatura y precipitación y en las medias de los meses más cálidos, fríos y secos. Para ello utiliza letras mayúsculas para definir los grandes grupos climáticos y minúsculas para los subgrupos o tipos climáticos (De Jesús, 2014). Desde su primera versión (Köppen, 1936), sigue siendo aun ampliamente utilizada por la comunidad científica (principalmente en Geografía, Climatología y Ecología) para estudios referentes a regímenes climáticos, modelaje ecológico e impactos de cambio climático (Aparecido et al., 2016, Beck et al., 2018, De Medeiros et al., 2018, Knoben et al., 2018).

De Medeiros et al. (2018) explican que esta clasificación tiene la ventaja de ser una de las más didácticas para evidenciar los cambios climáticos en un territorio. Por su parte, Andrade Júnior et al. (2005, citado por De Medeiros et al., 2018) establecen que la clasificación, al identificar regiones con homogeneidad climática y biogeográfica, tiende a proveer indicadores acerca de condiciones ecológicas y sus potenciales o debilidades agrícolas y ambientales.

Una de las aplicaciones más usadas del sistema de Köppen es el mapeo de los resultados derivados de la clasificación, el cual puede tener diversas aplicaciones dependiendo del nivel de detalle empleado (Almorox et al., 2015). Esta clasificación está basada en valores medios mensuales de precipitación y temperatura, la cual utiliza fundamentalmente tres letras para la descripción. La primera para indicar el grupo vegetal en la zona climática definida. La segunda expone la distribución anual de las lluvias, mientras que la tercera expone la variabilidad estacional térmica (Zeroual et al., 2019). Dado que la forma de calcular los tipos y subtipos climáticos de acuerdo con esta clasificación no ha cambiado significativamente con el tiempo, De Jesús (2014) expone flujogramas (Figura 3.1) y umbrales para concretar la definición de estos.

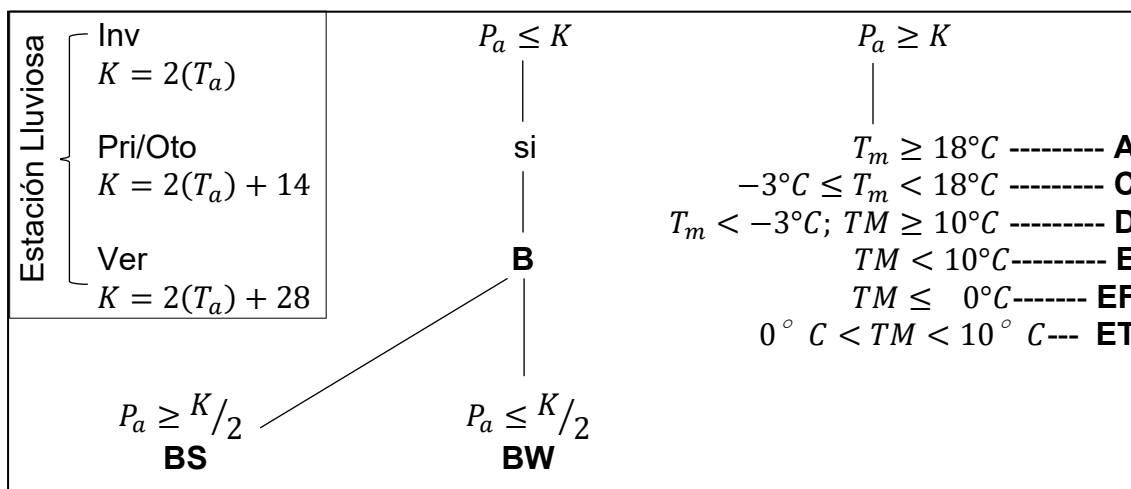


Figura 3. 1. Flujograma de zonas fundamentales (Köppen – Geiger). Modificado de De Jesús (2014) y Arnfield (2019). T_a : temperatura media anual (°C); P_a : precipitación media anual (cm); T_m : temperatura mínima mensual promedio (°C); TM : temperatura máxima mensual promedio (°C). A: tropical; B: seco; BS: seco de estepa; BW: desértico; C: templado; D: boreal; E: polar; ET: tundra; EF: hielo.

En cuanto a las características para diferenciar los climas A, C y D, Arnfield (2019) lo define como:

A:

f: $P_m \geq 60 \text{ mm}$

m: $P_m < 60 \text{ mm}$; $P_m \geq (100 - P_a/25)$

w: $P_m < 60 \text{ mm}$; $P_m < (100 - P_a/25)$

s: precipitación del mes más seco del verano $< 30 \text{ mm}$ y $< 1/3$ del mes más húmedo.

C, D:

w: precipitación del mes más seco del invierno menor que la décima parte del

mes más húmedo del verano.

f: precipitación uniformemente distribuida en el año. Criterios no aplicados para **s o w**.

Clasificación climática de Thornthwaite y Mather (1955)

Esta metodología fue propuesta originalmente por Thornthwaite (1948). A través de un balance hídrico del suelo (Thornthwaite y Mather, 1955) que estima movimientos de agua (como excesos y déficits), se calculan los índices de aridez (I_a) (Al Zamili et al., 2018), humedad (I_h) y global de humedad (I_m) (De Jesús, 2014). Knob en et al. (2018) detallan que Thornthwaite ideó su clasificación sin alinearse a la arbitrariedad dada por los umbrales de Köppen-Geiger, es decir, utilizando otros parámetros más representativos, significando en la actualidad una de las metodologías más ampliamente utilizadas y aceptadas. El método hace uso de valores de precipitación y temperatura media, así como también de evapotranspiración potencial (método de Thornthwaite) y de agua disponible en el suelo (Duarte et al., 2018), los cuales permiten definir la variabilidad estacional del clima como árido o húmedo (Talchabhadel y Karki, 2019), dependiendo de las necesidades de humedad del suelo (Aparecido et al., 2016).

De Jesús (2014) y Chowdhury (2018) expresan que el valor de evapotranspiración potencial (ETP) es dado por el método de Thornthwaite, el cual es uno de los más ampliamente utilizados en la actualidad.

$$ETP(cm/mes) = 1,6 * (10t/I)^a \quad [3.32]$$

$$I = \sum i ; i = (t/5)^{1,516} \quad [3.33]$$

$$a = 0,019I + 0,5 \quad [3.34]$$

Donde, t : temperatura media mensual (°C); I : índice calórico anual; i : índice calórico mensual.

Luego de haber calculado la ETP con los valores mensuales de temperatura y precipitación media, se calcula el balance hídrico del suelo, indicando sus entradas y salidas de agua por mes (Thornthwaite y Mather, 1955; De Jesús, 2014; Rossato, 2001, citado por Duarte et al., 2018).

A escala mensual, el balance se muestra como:

$$Bh_m = (Res_{m-1} + P_m) - ETP_m \quad [3.35]$$

Donde, Bh_m : balance hídrico del mes en curso (puede resultar positivo o negativo); Res_{m-1} : reserva de agua en el suelo para el mes anterior al tratado; P_m : precipitación del mes en curso; ETP_m : evapotranspiración potencial del mes tratado.

Los excesos y déficits pueden calcularse mediante:

$$E = Bh_m > Cc \quad [3.36]$$

$$D = Bh_m < 0 \quad [3.37]$$

Donde, E : excesos (cm); Cc : capacidad de campo (cm); D : déficits (cm).

Lo anterior puede representarse gráficamente mediante un climograma (De Jesús, 2014), el cual contrasta la precipitación-ETP (Y) versus los meses (X), en donde se evidencian los períodos de recarga, déficit o exceso que existan.

Posterior a la definición de los déficits y excesos, la metodología utiliza índices para clasificar la zona en función de su disponibilidad y variación de humedad.

$$Ia = (D/ETPa) \times 100 \quad [3.38]$$

$$Ih = (E/ETPa) \times 100 \quad [3.39]$$

$$Im = Ih - 0,6 \times Ia \quad [3.40]$$

Donde, Ia : índice de aridez; Ih : índice de humedad; Im : índice global de humedad (Tabla 3.3); D : déficits anuales (cm); E : excesos anuales (cm); $ETPa$: evapotranspiración potencial media anual (método de Thornthwaite) (cm).

Tabla 3. 3. Tipos climáticos de acuerdo con índice global de humedad.

Im	Símbolo	Tipo climático
≥ 100	A	Perhúmedo
80 – 99,9	B ₄	Muy húmedo
60 – 79,9	B ₃	Húmedo
40 – 59,9	B ₂	Moderadamente húmedo
20 – 39,9	B ₁	Ligeramente húmedo
0,1 – 19,99	C ₂	Subhúmedo
0 – (-33,39)	C ₁	Seco subhúmedo
-33,4 – (-66,69)	D	Semiárido
-66,7 – (-100)	E	Árido

Dado que la región donde se desarrolla la investigación tiene clima seco, para la variación de humedad se toma en cuenta el índice de humedad (en vez del índice de aridez). Las Tablas 3.4 y 3.5 son parte del algoritmo provisto por el método.

Tabla 3. 4. Subtipos climáticos aplicados para los climas C1, D y E.

Ih	tipo	Variación de humedad por exceso de agua
0 – 16,69	d	Pequeño o ninguno
16,7 – 33,3	s	Moderado en verano
16,7 – 33,3	w	Moderado en invierno.
> 33,3	s ₂	Grande en verano.
> 33,3	w ₂	Grande en invierno.

Tabla 3. 5. Eficiencia térmica de acuerdo con la ETPa

ETPa (cm)	tipo	Variación de humedad por exceso de agua
>= 114	A'	Megatérmico
57,1 – 113,9	B'	Mesotérmico
28,7 – 57,09	C'	Microtérmico
14,2 – 28,69	D'	Tundra
<= 14,19	E'	Glacial

De Jesús (2014) señala que esta metodología aporta información acerca de los excesos y déficits de humedad en el suelo, pudiendo estimar la disponibilidad de agua disponible para cultivos, excedentes de humedad y determinación de tipos climáticos presentes en una determinada región. Cabe destacar que al considerar suelos estándar de 1 m de profundidad, la metodología valora la disponibilidad hídrica desde una generalización.

Clasificación bioclimática de Holdridge (1967)

El modelo de zonas de vida fue desarrollado originalmente por Holdridge (1967), el cual asigna 39 tipos de vegetación (agrupados por ecosistemas) de acuerdo con tres variables climáticas fundamentales: temperatura media anual, biotemperatura anual y evapotranspiración potencial (Tabla 3.6). El modelo empírico conceptual de zonas de vida de Holdridge (1967) es comúnmente dispuesto en un diagrama triangular dividido en 39 pequeños hexágonos (cada uno con una zona de vida distinta). Cada lado del triángulo representa un eje de las variables utilizadas (Tapiador et al., 2019).

De Jesús (2014) expresa que mediante este modelo es posible diferenciar áreas mediante su comportamiento bioclimático, estableciendo que la vegetación natural potencial depende de factores como la biotemperatura (temperatura apta para la vida), la precipitación, la evapotranspiración y la altitud sobre el nivel del mar.

En función de lo anterior, es posible encontrar la zona de vida potencial a la que pertenecería un lugar en un momento determinado, sin que necesariamente implique que dicha característica esté presente en la actualidad. Si bien es un modelo con décadas de antigüedad, sigue siendo ampliamente usado en estudios ecológicos y ambientales (Tapiador et al., 2019). De Jesús (2014) establece los factores climáticos como:

$$BT_a = \frac{\sum_{i=1}^{12} T_i}{12} \quad [3.41]$$

$$P_a = \sum_{i=1}^{12} P_i \quad [3.42]$$

$$ETP_a = 59,93 * \frac{BT_a}{P_a} \quad [3.43]$$

Donde, BT_a : biotemperatura $[\geq 0^\circ C]$ ($^\circ C$); P_a : precipitación media anual (mm); ETP_r : ratio de evapotranspiración potencial; T_i : temperatura media anual ($^\circ C$); P_i : precipitaciones mensuales (mm).

Tabla 3. 6. Zonas de vida de Holdridge (De Jesús, 2014).

T $^\circ C$	P (cm)	ETP $_r$	Zona de vida	Símb.
>24	6,25 - 12,5	0,13 - 0,25	Desierto tropical	d-T
>24	12,5 - 25	0,25 - 0,5	Matorral desértico subtropical	Md-ST
>24	25 - 50	0,5 - 1	Monte espinoso subtropical	Me-ST
>24	50 - 100	1 - 2	Bosque muy seco tropical	Bms-T
>24	100 - 200	2 - 4	Bosque seco tropical	Bs-T
>24	200 - 400	4 - 8	Bosque húmedo tropical	Bh-T
>24	400 - 800	8 - 16	Bosque muy húmedo tropical	Bmh-T
>24	>800	>16	Bosque pluvial tropical	Bp-T
18 - 24	6,25 - 12,5	0,13 - 0,25	Desierto premontano	d-PM
18 - 24	12,5 - 25	0,25 - 0,5	Matorral desértico premontano	Md-PM
18 - 24	25 - 50	0,5 - 1	Matorral espinoso premontano	Me-PM
18 - 24	50 - 100	1 - 2	Bosque seco premontano	Bs-PM
18 - 24	100 - 200	2 - 4	Bosque húmedo premontano	Bh-PM
18 - 24	200 - 400	4 - 8	Bosque muy húmedo premontano	Bmh-PM
18 - 24	>400	>8	Bosque pluvial premontano	Bp-PM
12 - 18	6,25 - 12,5	0,13 - 0,25	Desierto montano bajo	d-MB
12 - 18	12,5 - 25	0,25 - 0,5	Matorral desértico montano bajo	Md-MB
12 - 18	25 - 50	0,5 - 1	Estepa espinosa montano bajo	Ee-MB
12 - 18	50 - 100	1 - 2	Bosque seco montano bajo	Bs-Mb
12 - 18	100 - 200	2 - 4	Bosque húmedo montano bajo	Bh-MB
12 - 18	200 - 400	4 - 8	Bosque muy húmedo montano bajo	Bmh-Mb
12 - 18	>400	>8	Bosque pluvial montano bajo	Bp-MB
6 - 12	6,25 - 12,5	0,13 - 0,25	Desierto montano	d-M
6 - 12	12,5 - 25	0,25 - 0,5	Matorral desértico montano	Md-M
6 - 12	25 - 50	0,5 - 1	Estepa montana	e-M
6 - 12	50 - 100	1 - 2	Bosque húmedo montano	Bh-M
6 - 12	100 - 200	2 - 4	Bosque muy húmedo montano	Bmh-M
6 - 12	>200	>4	Bosque pluvial montano	Bp-M
3 - 6	6,25 - 12,5	0,13 - 0,25	Desierto subalpino	d-SA
3 - 6	12,5 - 25	0,25 - 0,5	Matorral desértico subalpino	Md-SA
3 - 6	25 - 50	0,5 - 1	Matorral húmedo subalpino	Mh-SA
3 - 6	50 - 100	1 - 2	Páramo subalpino	p-SA
3 - 6	>100	>2	Páramo pluvial subalpino	Pp-SA
1,5 - 3	6,25 - 12,5	0,13 - 0,25	Tundra seca alpina	Ts-A
1,5 - 3	12,5 - 25	0,25 - 0,5	Tundra húmeda alpina	Th-A
1,5 - 3	25 - 50	0,5 - 1	Tundra muy húmeda alpina	Tmh-A
1,5 - 3	>50	>1	Tundra pluvial alpina	Tp-A
0 - 1,5	>0	>0	Níveo.	N

RESULTADOS

Como se ha mencionado, el área de estudio se ubica entre los meridianos 76° y 66° O y los paralelos 30° y 35° S en el área meridional de Sudamérica, más específicamente en el centro-occidente de la República Argentina, teniendo como principal frontera natural a la cordillera de Los Andes. Desde el punto de vista regional, se ubica en la zona de Cuyo, entre parte de las provincias argentinas de Mendoza, San Juan y San Luis.

Se consideró como sitio de cierre del sistema hidrográfico una localidad a 50 kilómetros aguas abajo del extremo meridional del sitio Ramsar. A su vez, las subcuencas pertenecientes al sistema del Desaguadero se delimitaron en función de sus principales drenajes (Figura 3.2). Sólo la cuenca del Vinchina - Bermejo permanece como excepción, ya que, además de no tener registros históricos hidroclimáticos (los cuales son prácticamente inexistentes), la cuenca se aleja mucho más al norte que la del río San Juan. Por ello, se delimitó siguiendo una línea imaginaria que uniera los extremos nor-orientales de la provincia de San Juan y del sitio Ramsar respectivamente. Como consecuencia de la delimitación realizada, la sumatoria de la superficie de las cuencas (Tabla 3.7) hacen que el total alcance los 149.402,80 km².

Tabla 3. 7. Superficies de cuencas.

Cuenca	Superficie (km ²)
Vinchina - Bermejo	6.765,6
San Juan	45.238,3
Mendoza	21.148,9
Tunuyán	25.379,6
Desaguadero	50.870,4
Total	149.402,8

Análisis exploratorio de datos

En cuanto a la estimación de datos faltantes, originalmente se disponía de 29 estaciones de precipitación y 17 de temperatura. Aquellas estaciones que contaron con más del 10 % de vacíos de información (mensuales) en función del total de registros, fueron desestimadas. Aplicando dicho umbral, el total de estaciones utilizadas fue 21 y 11 para precipitación y temperatura, respectivamente (Figura 3.2).

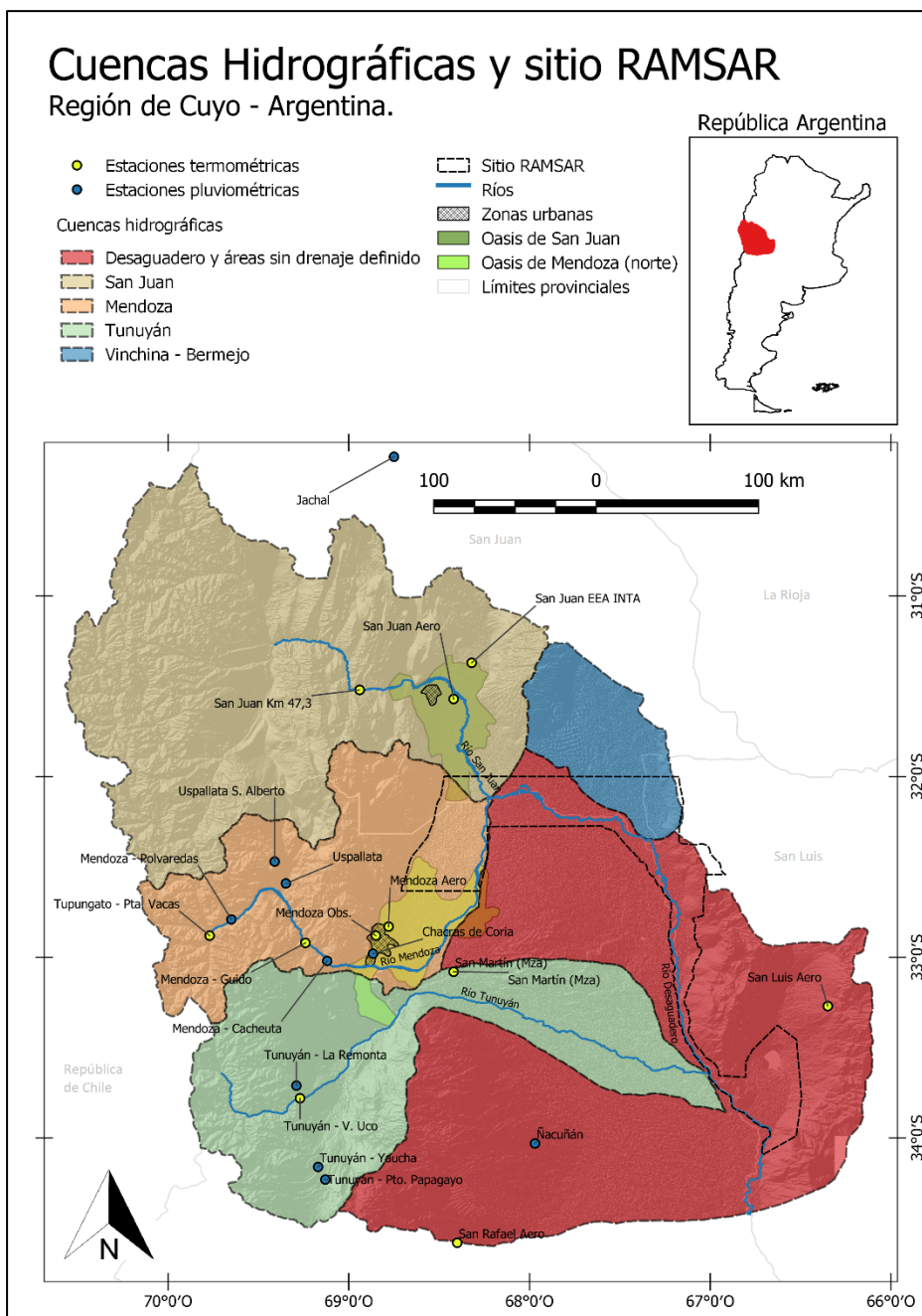


Figura 3. 2. Cuencas hidrográficas y delimitación del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero.

La metodología para calcular los datos faltantes requiere la identificación de estaciones piloto o base, a través del análisis de conglomerados (métodos de Elbow y Silhouette durante el período 1993 – 2014) para determinar el número óptimo de conglomerados, resultando ser cuatro (Figura 3.3). Habiendo establecido las relaciones entre los conglomerados generados (cuatro para precipitación), se aplicó el método de proporción normal con estaciones adyacentes [3.2] y el uso de la pendiente de regresión [3.4] para los casos en que la primera no pudiese ser usada.

Dado que para la temperatura se utilizó una modificación [3.5] de la ecuación de proporción normal, no fue necesario agrupar las estaciones mediante conglomerados.

Dentro de la validación de los datos faltantes, tanto las medidas de NRMSE (%) como del mSSIM, resultaron ser significativos mediante una prueba t de Student con $\alpha = 0,05$, así como también lo fue para el coeficiente $\left(\frac{TMA}{TMM_i}\right)$ aplicado en la ecuación [3.5] de temperatura.

Detección de valores extremos y atípicos (*outliers*)

Dada su importancia para verificar o eliminar los valores extremos o atípicos de las series contrastadas, se aplicó la prueba de MAD-score, la cual hizo señalar como posibles *outliers* varios de los datos considerados para su uso. Luego de su identificación, tanto para las variables de precipitación como de temperatura, se ordenaron por conglomerados (columnas) y por fecha de ocurrencia (filas). De acuerdo con su contexto espacial y temporal, se verificaron la totalidad de los valores extremos o atípicos que fueron señalados por la prueba, evitando de esta forma realizar investigaciones más profundas para decidir su verificación final o eliminación de las series temporales utilizadas.

Variabilidad anual y mensual media

En cuanto a la variabilidad anual y mensual, tanto el $RCVm$ como el CV de todas las estaciones de precipitación se presentaron como altas (> 30), lo que indica la elevada amplitud de lluvias en la zona (a escala anual y mensual promedio). Esta situación puede ser explicada por la importante estacionalidad de las precipitaciones y la enorme variación de su ocurrencia en el tiempo.

Con relación a las temperaturas, la variabilidad anual es alta (> 30), situación típica de zonas en latitudes medias continentales (32° S) donde la influencia estacional determina amplitudes promedio de alrededor de 15°C a 20°C con relación a las mínimas y máximas temperaturas de invierno y primavera, respectivamente. De acuerdo con la variabilidad térmica mensual media, esta resultó ser baja (< 20) en todas las estaciones y en todos los meses, salvo en dos estaciones dentro de la cordillera (Tunuyán – Valle de Uco y Tupungato – Punta de Vacas), las cuales presentaron variabilidad moderada ($20 < RCVm < 30$) en el invierno (donde se combina la estacionalidad y el efecto altitudinal) y en el resto de los meses catalogando como baja.

Por su parte, el índice de concentración de precipitación PCI anual (Figura 3.3) resultó ser mayor (alta a muy alta) en los conglomerados I y II del área de estudio, esto es, en la porción septentrional y central del mismo, mientras que, en la inferior, los conglomerados III y IV presentaron concentraciones pluviométricas altas a moderadas. En la Figura 3.3, además de observar la disposición espacial de los conglomerados de estaciones pluviométricas, también se evidencia que

aquellas con *PCI* anual alto a muy alto se localizan en las porciones más áridas de la región ($pp < 300$ mm). Por otro lado, los conglomerados III y IV, con *PCI* anual alto a moderado, se encuentran por encima de la isoyeta de 300 mm. Esta situación indica que las lluvias tienden a ser más concentradas en zonas que presentan menor pluviosidad.

Para el sitio Ramsar, alrededor de la mitad de su territorio se encuentra por debajo de la isoyeta de 300 mm, la cual presenta un *PCI* anual alto a muy alto (Figura 3.3).

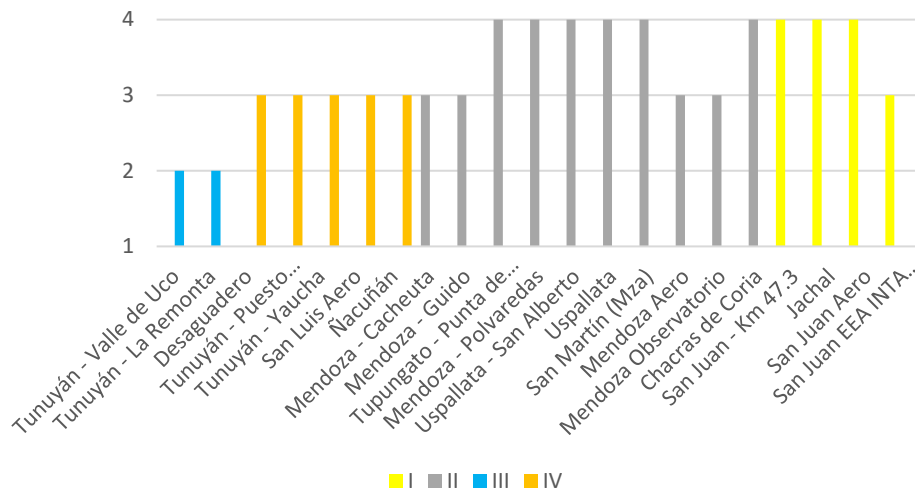


Figura 3. 3. Índice de concentración de precipitación anual (*PCI* anual). La disposición espacial de los conglomerados I, II, III y IV se observa en la Figura 3.16. Los valores indican: 1 = baja, 2 = moderada, 3 = alta, 4 = muy alta.

En cuanto al *PCI* mensual (Figura 3.4), la disposición de las concentraciones de precipitaciones es similar al del *PCI* anual, en donde los conglomerados III y IV (porción meridional y menos árida de la región) presentan valores de concentración bajos, es decir, de mayor homogeneidad. A contraparte de lo anterior, los conglomerados I y II (porción central y septentrional de la zona) poseen concentraciones que varían entre bajas y moderadas a altas. Ello concuerda con los resultados del *PCI* anual mencionados con anterioridad. Si se comparan las Figuras 3.3 y 3.4, se observa que la magnitud es mayor con relación al *PCI* anual frente al mensual, lo que indica que las concentraciones son mayores anualmente que a escala mensual.

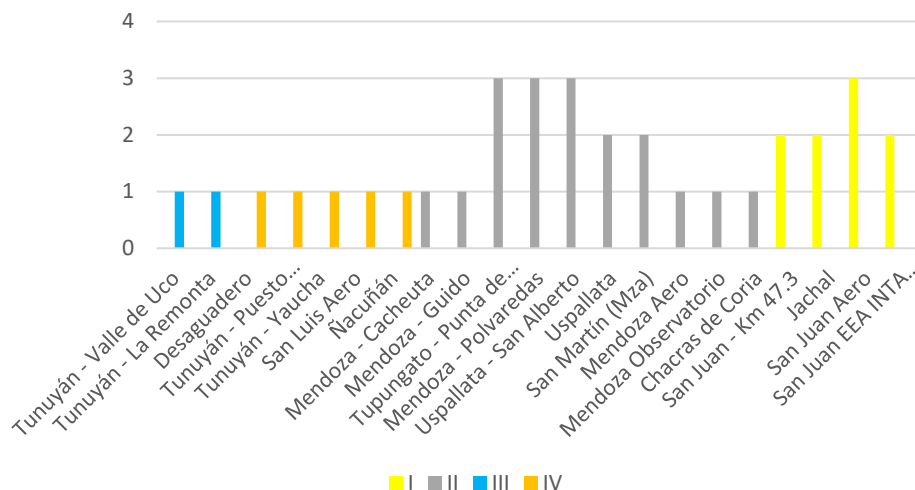


Figura 3. 4. Índice de concentración de precipitación mensual (*PCI* mensual). Los valores de concentración de lluvias indican: 1 = baja, II = moderada, III = alta, IV = muy alta.

Aleatoriedad, independencia, homogeneidad y tendencia

De acuerdo con los resultados de la prueba de Kendall, todas las estaciones que registran temperatura y precipitación presentaron aleatoriedad significativa ($\alpha = 0,05$). Asimismo, la prueba de Von Neumann arrojó que la totalidad de las series temporales de temperatura y precipitación presentaban independencia significativa. La excepción de lo anterior se presenta en la estación San Luis Aero, para la cual se rechazó la hipótesis nula (H_0) que los datos sean independientes. Cabe destacar que esta estación se encuentra en la porción más oriental y lluviosa (> 600 mm) de la zona de estudio (provincia de San Luis).

En cuanto a la prueba de homogeneidad de Pettitt, las estaciones termométricas presentan homogeneidad significativa, es decir, sin cambios en las series temporales. Sin embargo, para la precipitación, cuatro de las 21 estaciones consideradas no presentan homogeneidad. Cabe destacar que la prueba no permite conocer la ubicación temporal de los puntos de quiebre que denotan heterogeneidad. Esto puede deberse posiblemente a cambios físicos en ambientes locales (como diferencias temporales en el uso o cobertura de la tierra) o inconsistencias de registros en las mismas.

Por último, a través de la prueba de Mann-Kendall, se pudo constatar la ausencia de tendencia o cambios graduales significativos para las estaciones de temperatura y precipitación en el período considerado (1993 – 2014). A manera de resumen, se presentan las Tablas 3.8 y 3.9 con los resultados de las pruebas aplicadas para las estaciones y para las variables precipitación y temperatura respectivamente.

Tabla 3. 8. Resumen de pruebas aplicadas a precipitación. Período 1993 – 2014. Los colores de la columna “estación” denotan los conglomerados formados por los métodos de Elbow y Silhouette (1993-2014) (ver Figura 3.16 para su disposición espacial).

Estación	Variabilidad (mm)		PCI		Aleat.	Indep.	Outliers	Homog.	Tendencia
	Anual	Mes	PCI anual	PCI mensual	Kendall	V. Neu.	MAD-s	Pettitt	Mann-K.
Tunuyán - Valle de Uco	82,10 (A)	86,00 (A)	13,810 (M)	7,870 (B)	-1,85 (A)	<0,00010 (I)	Verificado	0,0600 (H)	0,14 (ST)
Tunuyán - La Remonta	86,30 (A)	87,80 (A)	14,490 (M)	7,980 (B)	-0,97 (A)	0,405000 (I)	Verificado	0,2900 (H)	0,55 (ST)
Desaguadero	101,9 (A)	94,30 (A)	16,700 (A)	8,650 (B)	-2,14 (A)	<0,00010 (I)	Verificado	0,02 (NH)	0,08 (ST)
Tunuyán - Puesto Papagayo	103,1 (A)	106,5 (A)	16,830 (A)	10,13 (B)	-2,73 (A)	0,104000 (I)	Verificado	0,6000 (H)	0,76 (ST)
Tunuyán - Yaucha	111,0 (A)	115,4 (A)	18,640 (A)	10,69 (B)	-1,12 (A)	0,033000 (I)	Verificado	0,030 (NH)	0,32 (ST)
San Luis Aero	104,3 (A)	88,40 (A)	16,910 (A)	8,500 (B)	-4,93 (A)	<0,0001 (NI)	Verificado	0,7100 (H)	0,68 (ST)
Nacuñán	107,8 (A)	105,2 (A)	18,020 (A)	9,840 (M)	-1,85 (A)	0,000300 (I)	Verificado	0,6500 (H)	0,88 (ST)
Mendoza - Cacheuta	115,9 (A)	117,5 (A)	19,850 (A)	10,85 (B)	-2,29 (A)	<0,00010 (I)	Verificado	0,010 (NH)	0,09 (ST)
Mendoza - Guido	104,3 (A)	104,1 (A)	17,290 (A)	9,500 (B)	-1,70 (A)	<0,00010 (I)	Verificado	0,5200 (H)	0,90 (ST)
Tupungato - Punta de Vacas	160,1 (A)	161,1 (A)	29,21 (MA)	16,19 (A)	-4,63 (A)	<0,00010 (I)	Verificado	0,2700 (H)	0,26 (ST)
Mendoza - Polvaredas	151,6 (A)	174,0 (A)	27,12 (MA)	18,97 (A)	-5,95 (A)	<0,00010 (I)	Verificado	0,0600 (H)	0,31 (ST)
Uspallata - San Alberto	147,3 (A)	166,3 (A)	26,15 (MA)	18,81 (A)	-9,61 (A)	0,002000 (I)	Verificado	0,1000 (H)	0,10 (ST)
Uspallata	147,6 (A)	151,8 (A)	25,65 (MA)	15,98 (M)	-8,30 (A)	0,016000 (I)	Verificado	0,1000 (H)	0,19 (ST)
San Martín (Mza)	130,3 (A)	127,9 (A)	21,99 (MA)	12,53 (M)	-3,02 (A)	0,004000 (I)	Verificado	0,1100 (H)	0,18 (ST)
Mendoza Aero	120,1 (A)	110,4 (A)	20,030 (A)	10,15 (B)	-2,44 (A)	0,001000 (I)	Verificado	0,0900 (H)	0,24 (ST)
Mendoza Observatorio	105,9 (A)	98,60 (A)	17,520 (A)	8,950 (B)	-1,12 (A)	0,016000 (I)	Verificado	0,0100 (NH)	0,07 (ST)
Chacras de Coria	114,8 (A)	99,10 (A)	26,81 (MA)	9,160 (B)	-3,32 (A)	0,001000 (I)	Verificado	0,0900 (H)	0,24 (ST)
San Juan - km 47,3	151,1 (A)	144,7 (A)	27,01 (MA)	14,11 (M)	-3,02 (A)	<0,00010 (I)	Verificado	0,0600 (H)	0,20 (ST)
Jáchal	152,3 (A)	142,1 (A)	27,12 (MA)	14,02 (M)	-4,34 (A)	0,005000 (I)	Verificado	0,2000 (H)	0,47 (ST)
San Juan Aero	154,5 (A)	162,0 (A)	28,43 (MA)	18,52 (A)	-9,47 (A)	0,035000 (I)	Verificado	0,7300 (H)	0,58 (ST)
San Juan EEA INTA (Pocito)	158,4 (A)	149,3 (A)	43,570 (A)	15,20 (B)	-8,15 (A)	0,036000 (I)	Verificado	0,2900 (H)	0,26 (ST)

Los términos abreviados Aleat., Indep., Homog. y Tendencia., hacen referencia a las pruebas de Aleatoriedad (Kendall), Independencia (Von Neumann), Homogeneidad (Pettitt) y Tendencia (Mann-Kendall), respectivamente.

- **Variabilidad:** (A): Alta.
- **PCI:** (B): Baja; (M): Moderada;
(A): Alta; (MA): Muy Alta.

- **Aleat:** (A): Alta.
- **Indep:** (I): Independiente;
(NI): No Independiente

- **Homog:**
(H): Homogéneo;
(NH): No Homogéneo.

- **Tendencia:**
(ST): Sin Tendenci

Tabla 3. 9. Resumen de pruebas aplicadas a temperatura. Período 1993 – 2014.

Estación	Variabilidad (RCVm %)		Aleat.	Indep.	Outliers	Homog.	Tendencia
	Anual	Mensual	Kendall	V.Neu.	MAD-s	Pettitt	Mann-K.
San Juan - Km 47,3	42,62 (A)	5,76 (B)	-18,26 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,981 (H)	0,649 (ST)
San Juan Aero	48,99 (A)	7,43 (B)	-18,69 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,997 (H)	0,689 (ST)
San Juan EEA INTA (Pocito)	48,23 (A)	6,74 (B)	-17,67 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,961 (H)	0,728 (ST)
Mendoza - Guido	51,32 (A)	9,23 (B)	-16,20 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,989 (H)	0,820 (ST)
Tupungato - Punta de Vacas	61,29 (A)	20,46 (M*)	-14,74 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,464 (H)	0,435 (ST)
San Martín (Mza)	45,14 (A)	6,57 (B)	-18,84 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,894 (H)	0,476 (ST)
Mendoza Aero	46,74 (A)	5,88 (B)	-18,69 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,996 (H)	0,724 (ST)
Mendoza Observatorio	44,64 (A)	6,26 (B)	-18,55 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,975 (H)	0,663 (ST)
San Luis Aero	37,78 (A)	6,94 (B)	-16,76 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,923 (H)	0,610 (ST)
San Rafael Aero	48,08 (A)	7,50 (B)	-18,55 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,884 (H)	0,630 (ST)
Tunuyán - Valle de Uco	57,10 (A)	11,83 (M**)	-18,55 (A)	< 0,0001 (I)	Verificado	0,122 (H)	0,118 (ST)

Los términos abreviados Aleat., Indep., Homog. y Tendencia., hacen referencia a las pruebas de Aleatoriedad (Kendall), Independencia (Von Neumann), Homogeneidad (Pettitt) y Tendencia (Mann-Kendall), respectivamente.

- **Variabilidad:** (B): Baja; (M*): moderada a alta en invierno y baja el resto de los meses; (M**): moderada en invierno y baja en el resto de los meses; (A): Alta.
- **Aleat:** (A): Alta.
- **Indep:** (I): Independiente;
- **Homog:** (H): Homogéneo;
- **Tendencia:** (ST): Sin Tendencia

Caracterización climática temporal

El régimen térmico de las 11 estaciones consideradas (Tabla 3.9), se presenta de forma unimodal, con máximas en los meses de verano y mínimas durante el invierno (junio – julio). Este tipo de climas es típico de regiones en latitudes medias ($\approx 32^\circ$ S). De acuerdo con Strahler (1980, citado por De Jesús, 2014), estas características se asocian a un régimen templado continental, con gran amplitud térmica anual (en este caso, de 15 a 20 °C) y ligado a las variaciones de declinación solar anual (estaciones). A continuación (Figura 3.5), se presentan cuatro estaciones índices (consideradas por estar aproximadamente alrededor del sitio Ramsar, ver Figura 3.2), en el cual puede observarse el régimen unimodal que presentan, así como sus magnitudes.

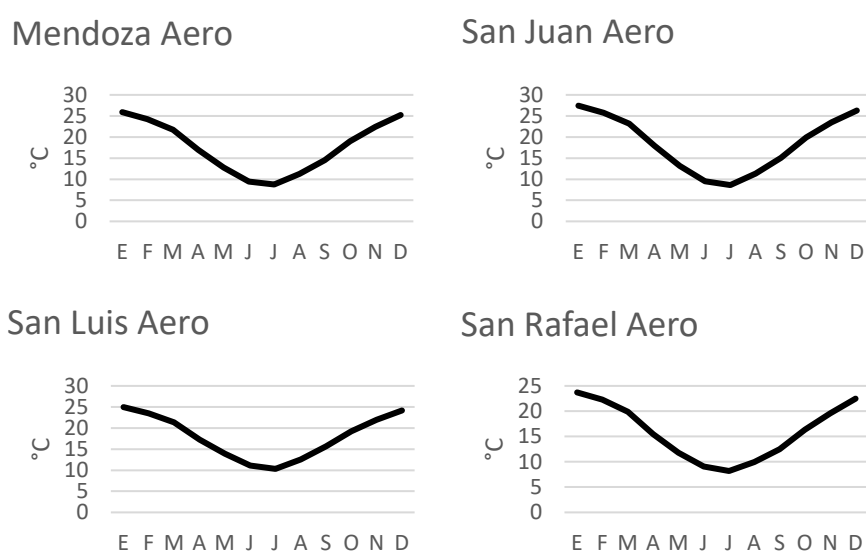


Figura 3. 5. Temperaturas medias mensuales para las estaciones Mendoza Aero, San Juan Aero, San Luis Aero y San Rafael Aero. Período 1993 – 2014.

La variabilidad media mensual, dada por los valores de temperatura media mensual y RCVm, se observa en la Figura 3.6. Las estaciones índices mencionadas con anterioridad presentan temperaturas más elevadas y se orientan hacia los meses de verano, con una variabilidad mayor hacia los meses invernales.

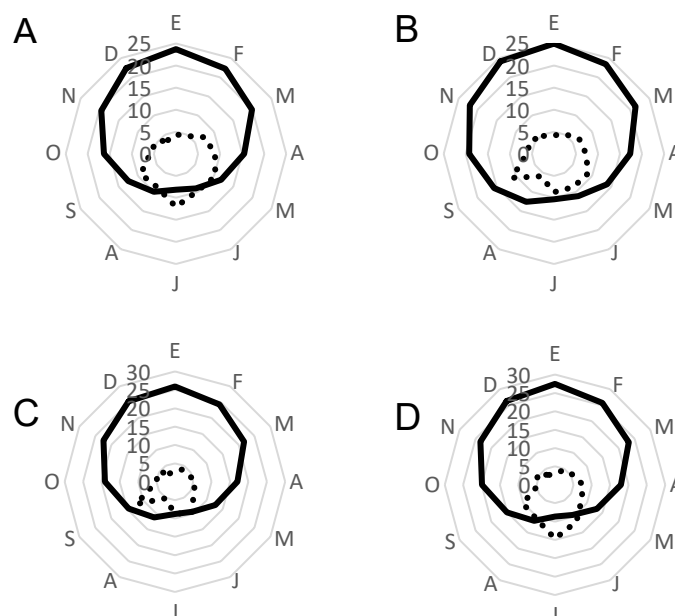


Figura 3. 6. Temperaturas medias mensuales ($^{\circ}\text{C}$, línea continua) y RCVm (línea punteada) para las estaciones San Rafael Aero (A), San Luis Aero (B), Mendoza Aero (C) y San Juan Aero (D). Período 1993 – 2014.

Para analizar adecuadamente el contexto de las 11 estaciones utilizadas, se muestra la siguiente figura de retícula polar (Figura 3.7), en la cual se contrastan las temperaturas y desviaciones medias. La disposición de las estaciones en el gráfico denota cierto rigor geográfico, comenzando con la estación San Juan - Km 47,3 (en sentido horario) en el norte de la región (San Juan). De esta forma se tienen las estaciones en el Llano y piedemonte (San Juan - Km 47,3 a Mendoza - Guido) y las de la cordillera (Tunuyán - Valle de Uco y Tupungato - Punta de Vacas).

Las mayores temperaturas medias (20°C) se presentan en el Llano entre San Juan y Mendoza (Figura 3.2) y estas comienzan a disminuir entre el piedemonte (Mendoza Observatorio y Mendoza - Guido) hacia la cordillera (Tunuyán - Valle de Uco y Tupungato - Punta de Vacas). Por su parte, las desviaciones estándar medias se mantienen relativamente constantes, alrededor de los 5°C , siendo un poco mayores hacia las estaciones del llano de San Juan (San Juan Aero y San Juan EEA INTA - Pocito).

En el mismo orden de ideas, la variabilidad dada por el RCVm (Figura 3.8), se expresa de forma inversa a las temperaturas medias, indicando valores menores en el llano (cerca de 50%), intermedios hacia el piedemonte y mayores hacia la cordillera, sobrepasando el 60% . Dada la fisiografía de estos ambientes, es notable la influencia topográfica en las mismas, con mayor homogeneidad hacia altitudes más bajas y relieves más planos y mayor heterogeneidad hacia las montañas.

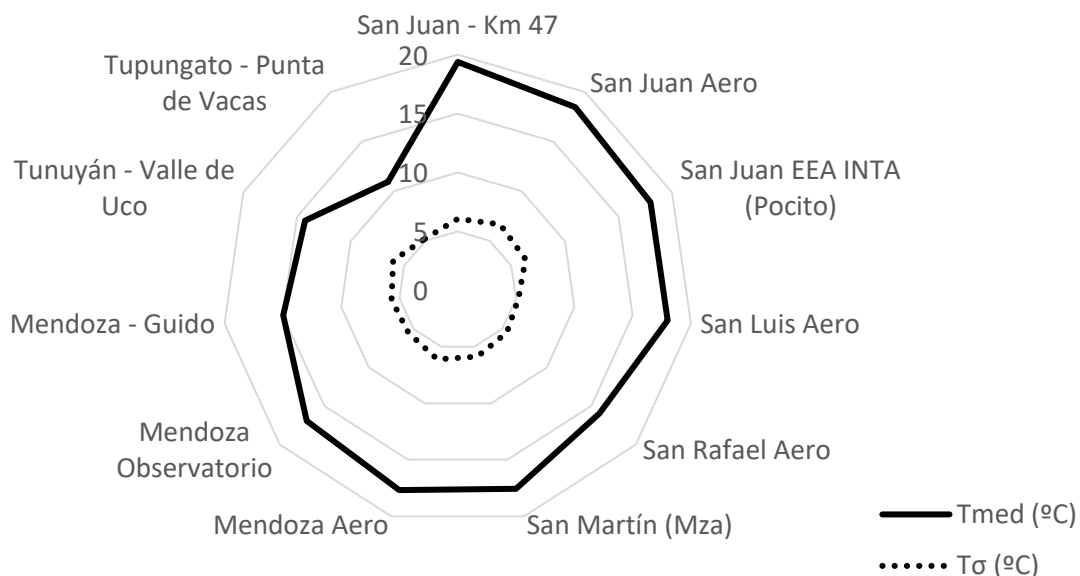


Figura 3. 7. Temperaturas medias (T_{med} °C) y desviaciones estándar (σ_{med} °C) para las estaciones consideradas. Período 1993 – 2014.

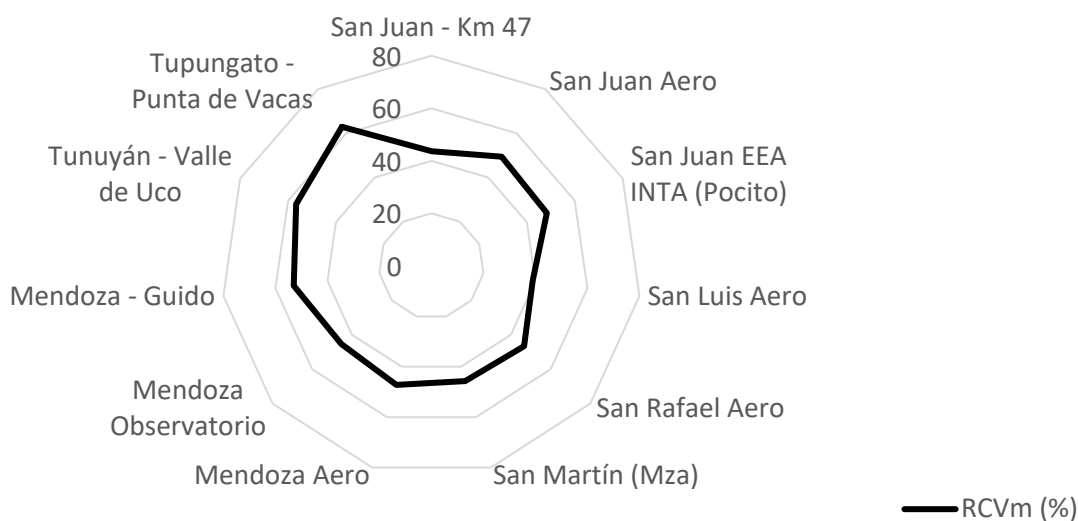


Figura 3. 8. Variabilidad térmica (RCVm %). Período 1993 – 2014. La disposición de las estaciones en el gráfico tiene la misma referencia que la Figura 3.7 y su justificación previa.

Las 21 estaciones consideradas presentan gran variabilidad en la precipitación entre sus valores promedio. En la Figura 3.9 se presenta un histograma con las precipitaciones anuales medias de cada estación y las desviaciones estándar medias correspondientes. En la figura están agrupadas por los conglomerados mencionados con anterioridad, situándose de izquierda a derecha los conglomerados de: llano de San Juan, llano del sur de la zona, llano piedemontano y cordillera central y dos estaciones de piedemonte junto al río Tunuyán (Figura 3.16).

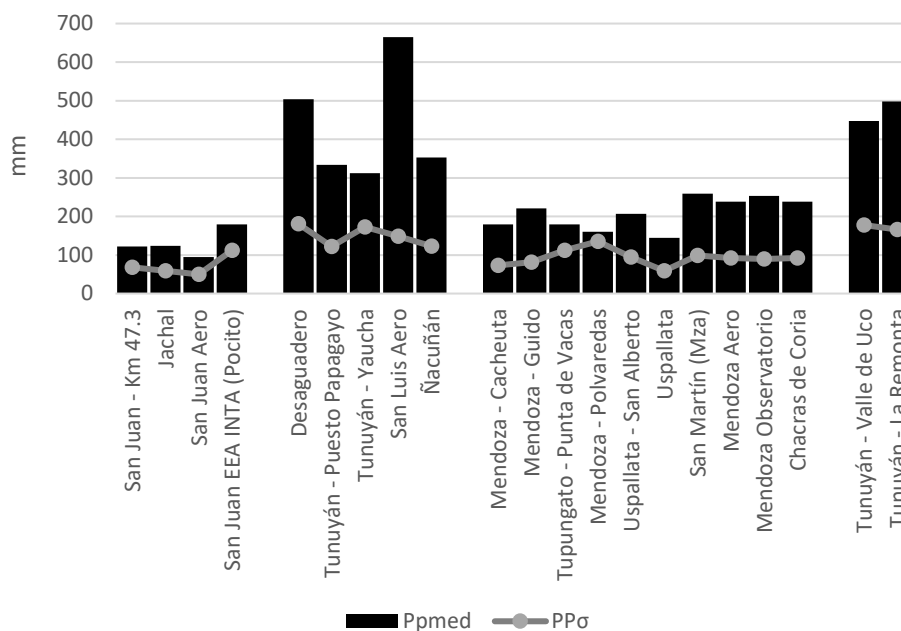


Figura 3. 9. Precipitación media anual (mm) y desviación estándar media anual de estaciones (mm) agrupadas por conglomerados. Período 1993 – 2014.

La diferencia entre conglomerados y la magnitud que presenta cada estación se presenta en la Figura 3.9. De izquierda a derecha se destaca el primer conglomerado, en donde ninguna estación registra valores por encima de los 200 mm anuales. Asimismo, todas las estaciones consideradas se encuentran por debajo de los 500 mm al año (a excepción de la estación San Luis Aero, perteneciente a la provincia de San Luis). Del mismo modo, en la misma Figura 3.9 es notable observar que las desviaciones tienden a ser, en proporción, más elevadas en estaciones con escasa precipitación que en sus pares con mayor pluviosidad, lo que indica que, en las zonas más áridas, las variaciones pluviométricas tienden a ser mayores que en las más húmedas.

En la zona, las series temporales presentan una heterogeneidad de magnitudes. Esto se observa en la Figura 3.10, en la cual se escogieron cuatro estaciones índices (alrededor del sitio Ramsar), las cuales están organizadas de izquierda a derecha en el gráfico en función de su ubicación en el territorio (norte, este, sur y oeste). Además de la magnitud variable entre estaciones, también se destaca la heterogeneidad en cuanto a años más y menos lluviosos dentro de determinada estación.

Con relación a las precipitaciones medias mensuales de las estaciones índices consideradas, se observa que la amplitud (valor máximo mensual menos el mínimo mensual) de lluvias es mayor en aquellas con mayor precipitación que en las más secas. En este orden de ideas, la amplitud en la estación San Juan Aero no sobrepasa los 20 mm, mientras que en la más lluviosa (San Luis Aero) sobrepasa los 115 mm (Figura 3.11).

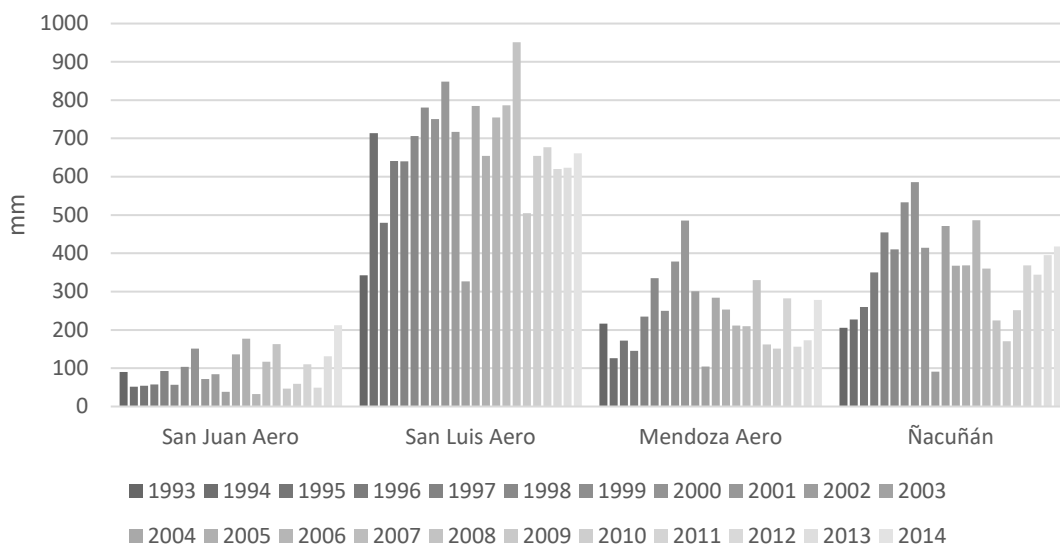


Figura 3. 10. Precipitación anual media (mm) del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero, San Luis Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán.

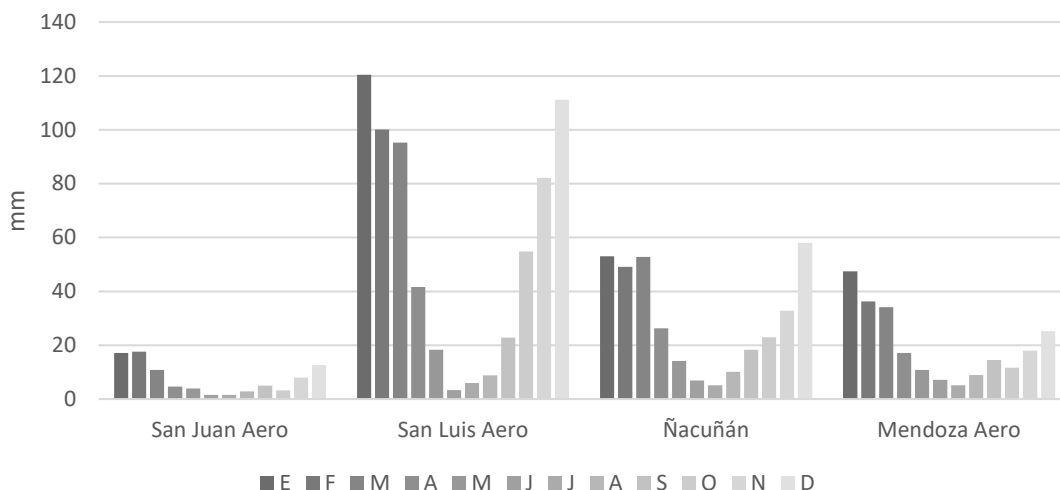


Figura 3. 11. Precipitación media mensual (mm) del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero, San Luis Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán. El eje x indica los meses del año.

Aunque lo presentado en la Figura 3.11 hace alusión a las medias mensuales, en la Figura 3.12 se muestra un histograma de los coeficientes de variación (CV) medios mensuales de precipitación. A diferencia de lo que muestra la Figura 3.11, el coeficiente de variación medio mensual de la estación San Juan Aero es la que presenta mayores variabilidades en los 22 años de registros considerados, resultando particularmente elevados los meses de junio y agosto. Asimismo, tomando en cuenta cada mes, es la estación San Luis Aero (la más lluviosa), la que presenta menor CV de las cuatro estaciones consideradas en 10 de los 12 meses medios del año.

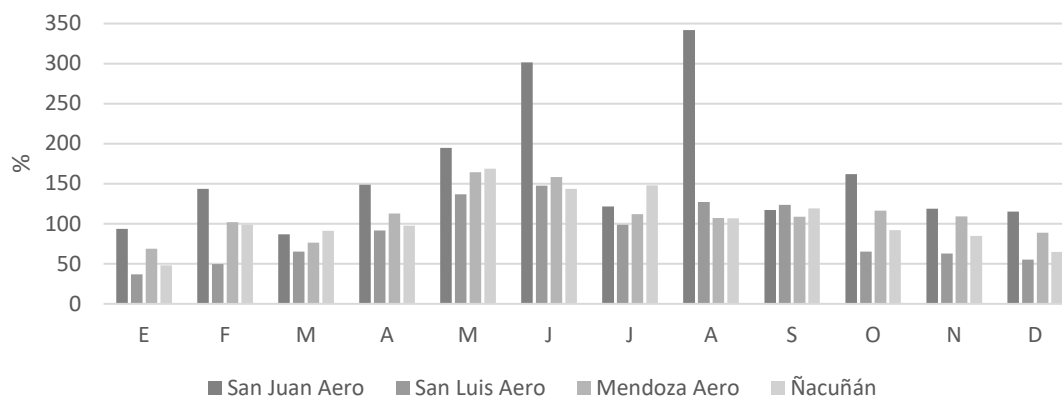


Figura 3. 12. Coeficiente de variación medio mensual (%) de precipitación del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero, San Luis Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán.

Dado que en la metodología se usó el RCVm (dada su robustez frente a *outliers*), en la Figura 3.13 fue necesario aplicar el coeficiente de variación ($CV = [\sigma/\bar{X}] * 100$). Esto se debe a que el RCVm [ec 3.12] tiene limitaciones para incluir valores cero en su ecuación (indeterminación por división entre cero). Sin embargo, para la variabilidad media y sin el inconveniente de la división por cero, en la Figura 3.13 se presenta el RCVm ordenado por subgrupos de conglomerados. En esta figura, se expresa la variabilidad media anual de cada estación considerada, donde, en concordancia con lo analizado previamente, son las estaciones más lluviosas (como San Luis Aero) las que presentan mayor variabilidad (> 120 %). Si bien pudiera esperarse que estaciones secas como San Juan Aero tuviesen los menores valores de RCVm, dado que se trata de una medida relativa, las estaciones con menores magnitudes son las del último conglomerado (Tunuyán - Valle de Uco y Tunuyán - La Remonta) respectivamente.

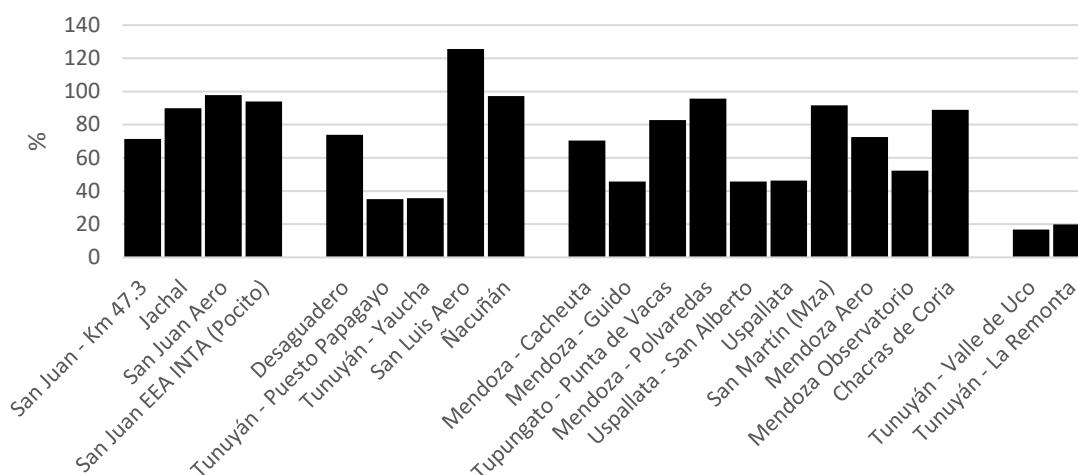


Figura 3. 13. Variabilidad media anual de precipitación (%) por RCVm del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero, San Luis Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán.

Por último y como parte de la metodología para caracterizar el clima de acuerdo con el método de Thornthwaite, en la Figura 3.14 se presentan los climogramas correspondientes a las estaciones San Juan Aero, San Luis Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán. En dichos diagramas se contrasta la precipitación (PP) media mensual versus la evapotranspiración potencial (ETP) media mensual (1993 – 2014). Al igual que en la Figura 3.9, se observan las diferencias entre las magnitudes de precipitaciones, resaltando el contraste entre la estación San Juan Aero y San Luis Aero. Asimismo, la ETP es más elevada en los ambientes más áridos (como San Juan Aero, Mendoza Aero y Ñacuñán) y de menor magnitud en zonas más lluviosas (San Luis Aero).

Dado que ambas variables se expresan en centímetros, la relación de éstas en los gráficos (y su contraste mediante un balance hídrico mensual) expresa déficits de agua en el suelo en todos los meses ($ETP > PP$). Si bien es un método empírico, es una aproximación de la aridez que presentan estos paisajes, entre cuyas estaciones mencionadas se encuentra el humedal Ramsar.

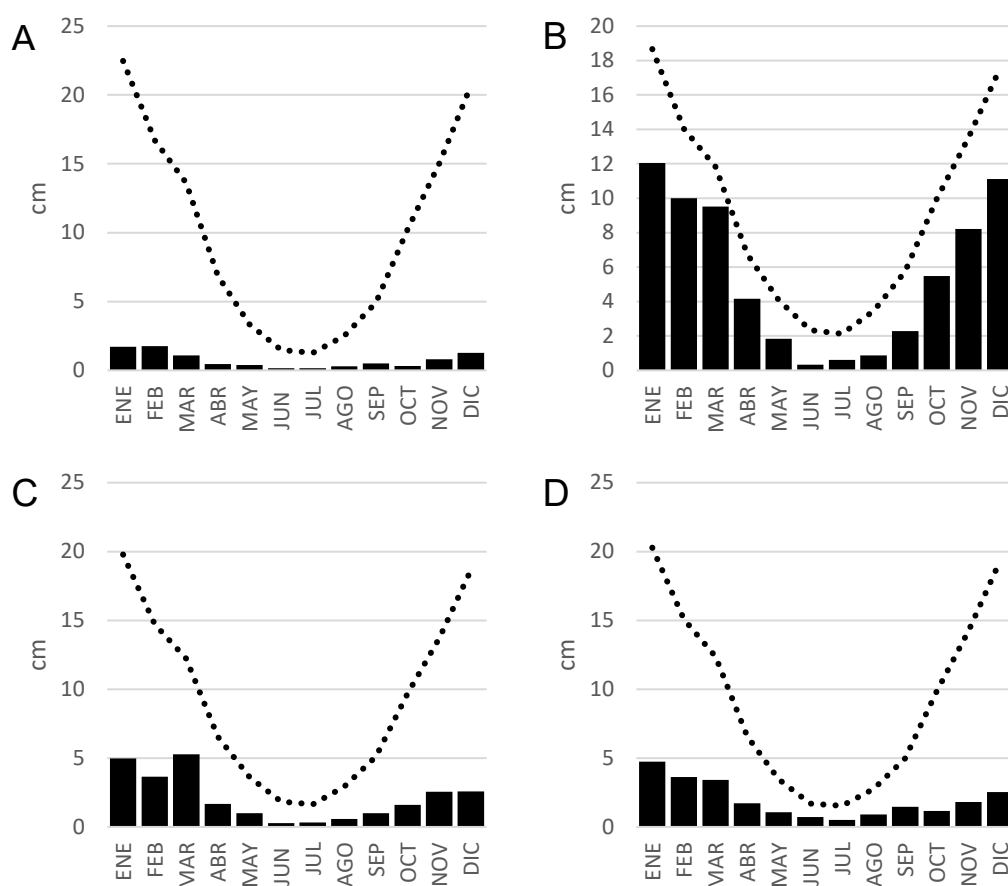


Figura 3. 14. Climogramas del período 1993 – 2014 para las series de tiempo de las estaciones índice San Juan Aero (A), San Luis Aero (B), Mendoza Aero (C) y Ñacuñán (D). Las barras indican la precipitación media mensual (cm) versus la evapotranspiración potencial media mensual, calculada por el método de Thornthwaite (línea punteada).

Caracterización climática espacial

El análisis espacial de las 21 estaciones pluviométricas y 11 termométricas permite conocer los patrones de estas variables en el territorio, así como también las relaciones que, entre estas, logran dar con una caracterización climática aproximada. En las Figuras [3.15](#) y [3.16](#) se presentan las bandas termopluviométricas que representan espacialmente a la temperatura y precipitación media, respectivamente. Fueron dibujadas a partir de la interpolación de los valores medios de cada estación, por el método de la ponderación de distancia inversa (IDW). A su vez, dichas bandas son representadas mediante fajas coloreadas para denotar su espacialidad. No se clasificó o interpoló aquellas estaciones localizadas a altitudes superiores a los 2.000 msnm (SMN, 2019b). Las razones radican en la escasez de estaciones en la zona (Figuras [3.15](#) y [3.16](#)), en las incongruencias generadas por la interpolación sobre zonas con relieves accidentados y porque la zona objeto de estudio (sitio Ramsar) se localiza en la zona de planicie, con altitudes bajas y topografía menos irregular.

Cabe destacar que el número y homogeneidad de posición de las estaciones no es la óptima, por lo que el proceso de interpolación pudo incurrir en errores. Sin embargo, esto pudo ser disminuido dada la topografía regular de la zona.

En la región, las bandas isotérmicas oscilan entre los 14 °C a los 19 °C (Figura [3.15](#)), presentando un gradiente positivo hacia el norte (San Juan) y este y negativo hacia el suroeste. Predomina la banda entre las isotermas de 17 y 18 °C. Inmersa en esta, se localiza la totalidad del sitio Ramsar de estudio, así como también la ciudad y oasis de Mendoza. Por su parte, la ciudad y oasis de San Juan se encuentran sobre la isoterma de los 18 °C, representando así la zona más cálida de la región.

El gradiente de las precipitaciones medias (Figura [3.16](#)) es negativo hacia el norte y positivo hacia el sur y sureste. En estos extremos se ubican las zonas más secas (San Juan, con precipitación menor a 200 mm medios anuales) y más húmedas (San Luis, con más de 600 mm medios anuales) respectivamente. La amplitud diferencial de las precipitaciones, entre los máximos y mínimos, es de 500 mm. Dada la heterogeneidad observada, el sitio Ramsar se ubica en su mayor proporción (sección norte) en una zona con precipitaciones inferiores a 300 mm, dejando la parte sur del mismo por encima de los 300 mm y cercano a los 600 mm en el extremo sureste.

Es notable resaltar, que tanto las ciudades de Mendoza y San Juan como sus respectivos oasis, se ubican en las zonas más secas, ambas por debajo de los 300 mm. Mediante el cálculo de los métodos isoyético e isotérmico, en la Tabla [3.10](#) se muestran la temperatura y precipitación media de toda el área, las cuales fueron calculadas de acuerdo con la ponderación espacial de las magnitudes, versus sus respectivas superficies.

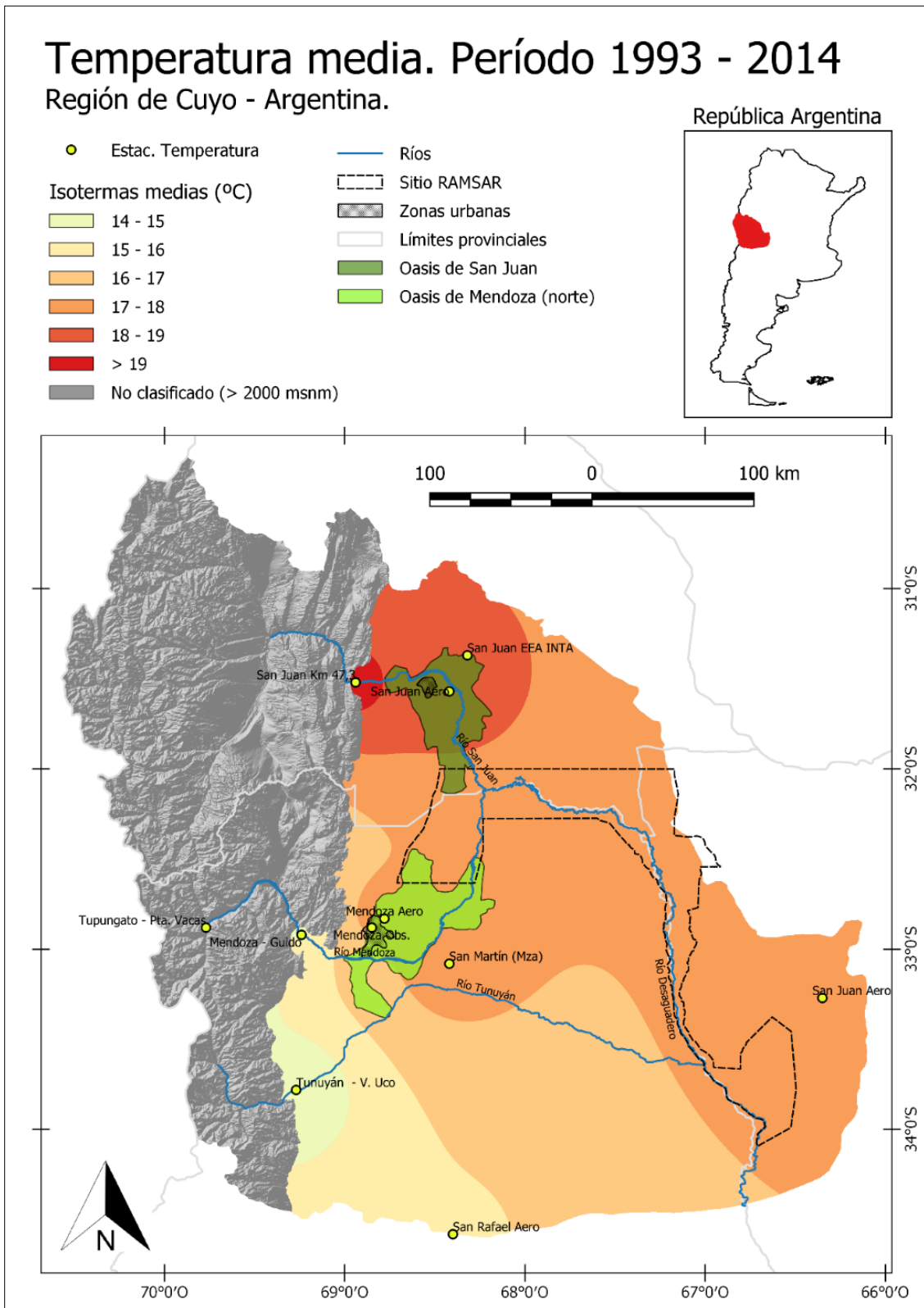


Figura 3. 15. Bandas isotérmicas medias. Período 1993 - 2014. Fuente de datos: SMN (2019), SIPHN, (2019), INTA (2019), IADIZA (2019).

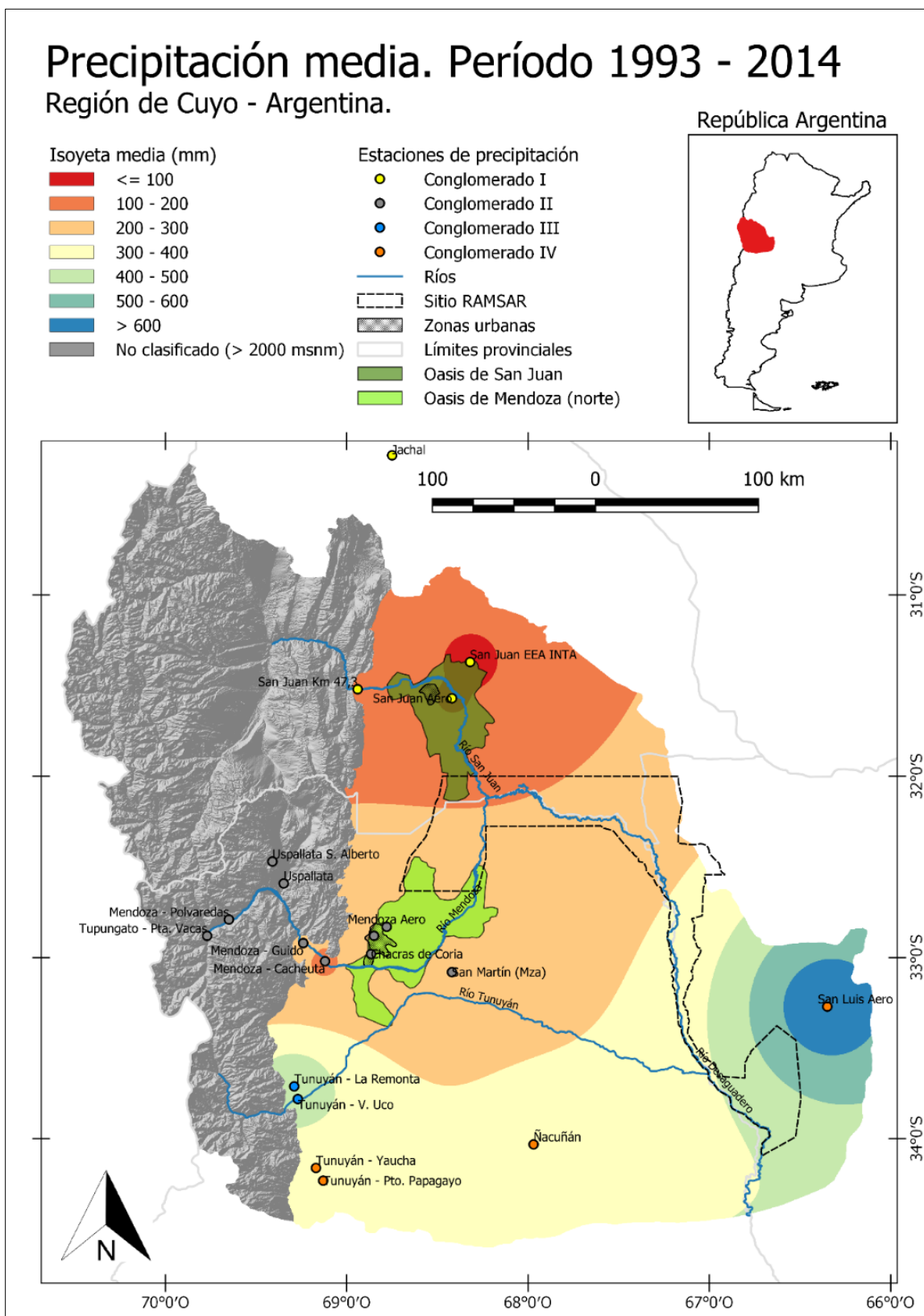


Figura 3. 16. Bandas pluviométricas medias y conglomerados de estaciones de precipitación. Período 1993 - 2014. Fuente de datos: SMN (2019), SIPHN, (2019), INTA (2019), IADIZA (2019).

Tabla 3. 10. Valores medios de precipitación y temperatura, calculados a partir de isotermas medias (Figura 3.15) e isoyetas medias (Figura 3.16) para el período 1993 – 2014.

Temperatura media (°C)	Precipitación media (mm)
17,0	299,1

Límites climáticos basados en precipitación y temperatura

Aplicados los índices de Lang (Figura 3.17) y de Martonne (Figura 3.18), se contrasta el territorio en función de sus características termo-pluviométricas. De acuerdo con el índice de Lang, el 57,6 % del área total (99.443,9 km²) se clasifica como árido, frente al restante 42,4 % como semiárido. Más de 3/4 partes del sitio Ramsar se ubican dentro de la zona árida, incluyendo a su vez la totalidad de los oasis y ciudades de San Juan y Mendoza. Si bien el sur y sureste ostentan mayores precipitaciones que el centro y norte de la región, ésta es clasificada como semiárida.

El índice de Martonne discretiza el área en cuatro clases (Figura 3.18), teniendo concordancia con Lang en que el norte es más árido que el sur. En este sentido, asocia el 9,2 % como muy árido, ubicado al norte y abarcando la ciudad y casi la totalidad del oasis de San Juan. Por su parte, la porción norte del Ramsar y el oasis y ciudad de Mendoza entran dentro de la zona árida (36,9 %), clasificando al sur (49,1 %) con características semiáridas (junto al resto del Ramsar) y el extremo este (San Luis) como subhúmedo, con el 4,8 % del total.

La clasificación de Köppen presenta similitudes con la de Lang y Martonne, diferenciándose en que no asigna un límite climático a cada zona sino un taxón de su propia clasificación (Figura 3.19). De esta forma, un 52,9 % del área (porción centro-norte) presenta un clima BW (árido desértico), la cual abarca los oasis y ciudades, así como la sección norte del Ramsar. Por otro lado, el sur está dominado (46 %) por el clima árido de estepas (BS), dejando al extremo este un 1,1 % del total con un clima Cs (templado seco).

Teniendo en cuenta la clasificación de Thornthwaite, el uso de la precipitación y temperatura para hallar índices de humedad (a través de un balance hídrico del suelo), permite clasificar el territorio de acuerdo con sus potenciales de humedad y evapotranspiración. En la Figura 3.20 se observa el extremo norte (13,2 %) como clima DdA' (semiárido megatérmico con escasa variación de humedad). La mayor parte del área (76,9 %) y donde se ubica el sitio Ramsar y ciudad/oasis de Mendoza, se caracteriza como DdB', o semiárido mesotérmico con poca variación de humedad. Por último y en el extremo sureste (10 % del total), se encuentra el clima C₁dB', o seco subhúmedo mesotérmico sin variación de humedad (el cual abarca el extremo sur del sitio Ramsar, con la laguna del Bebedero incluida).

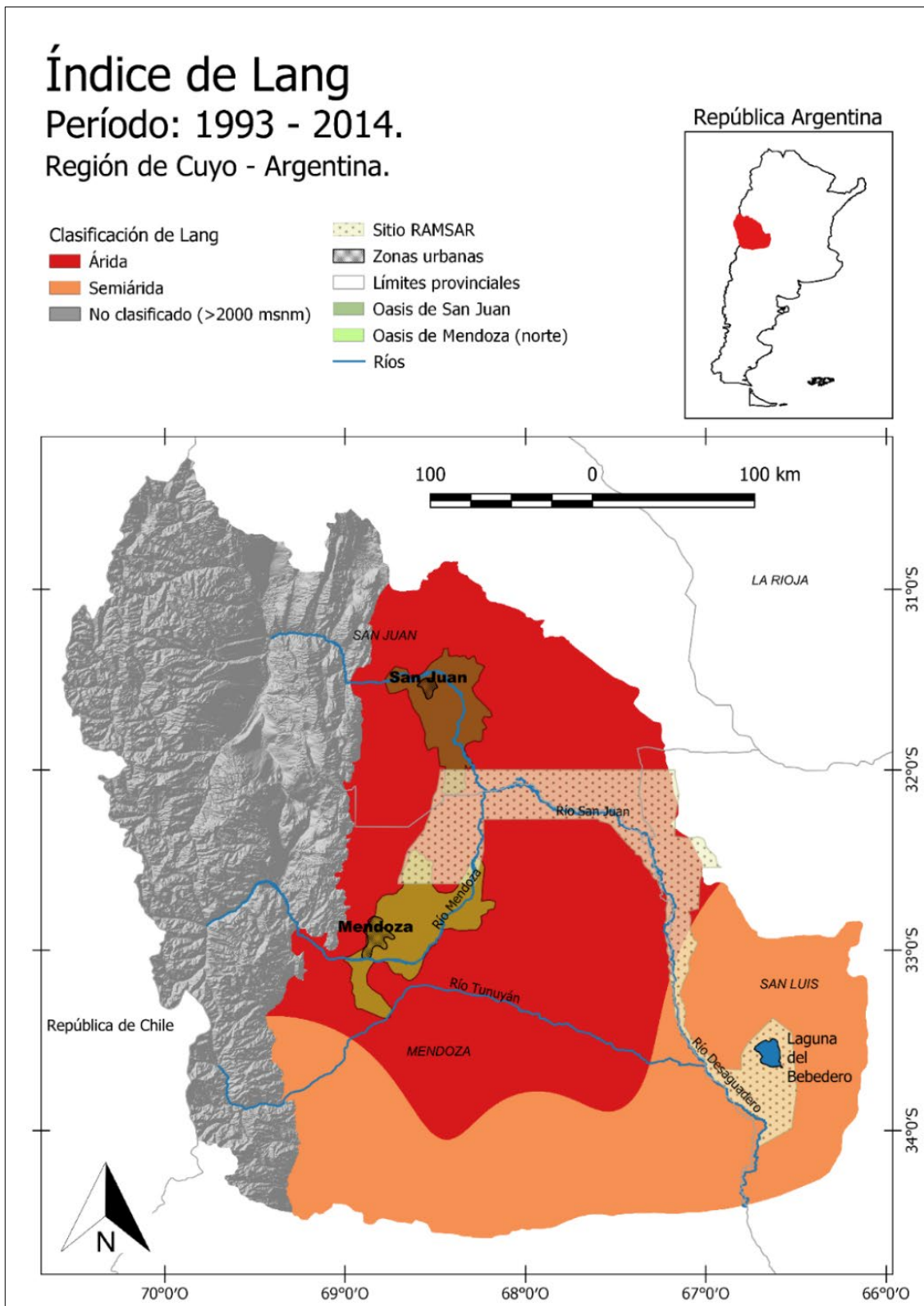


Figura 3. 17. Límites climáticos basados en temperatura y precipitación según el índice de Lang. Período 1993 – 2014. Fuente de datos: SMN (2019), SIPHN (2019), INTA (2019), IADIZA (2019).

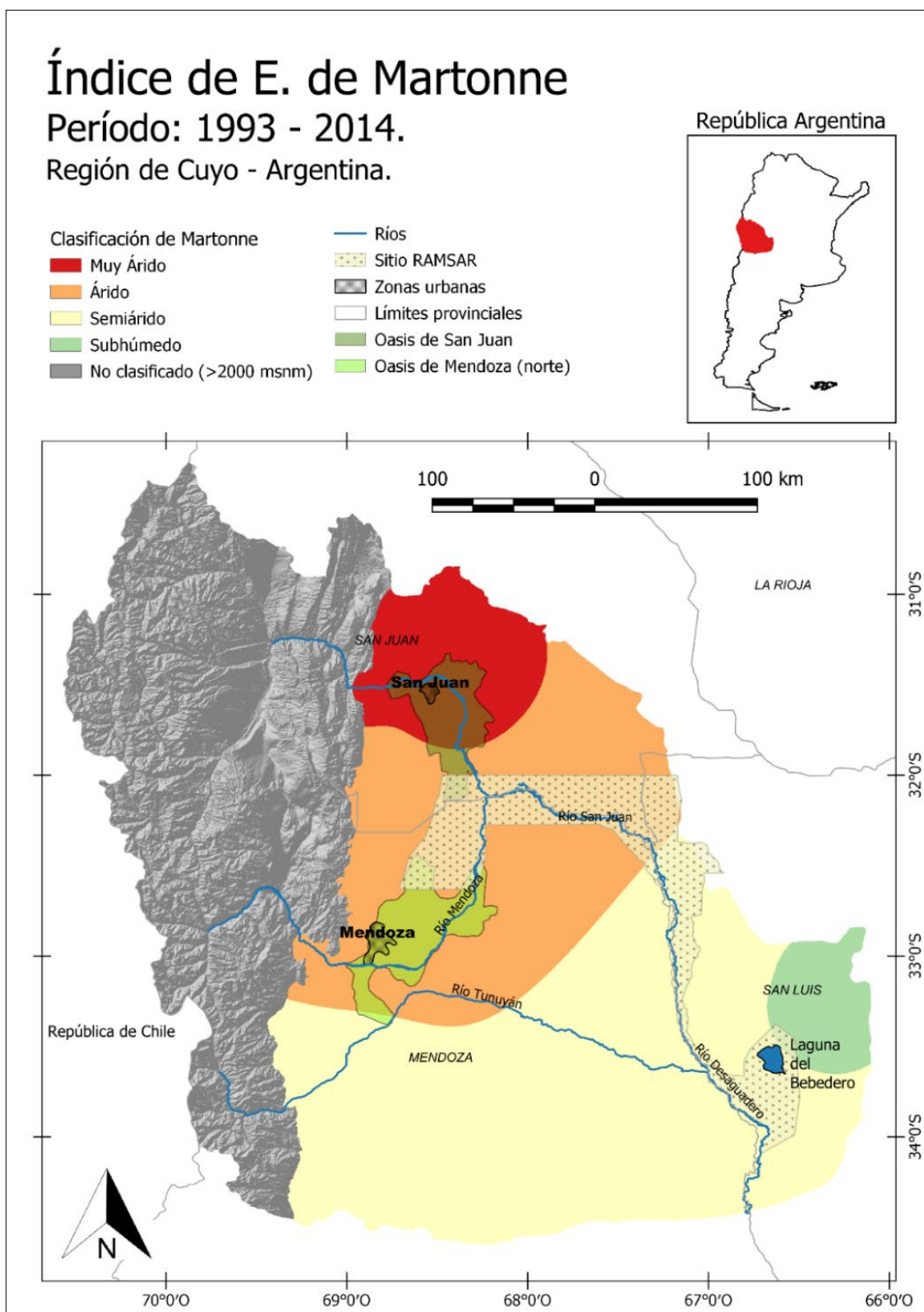


Figura 3. 18. Límites climáticos basados en temperatura y precipitación según el índice de Emmanuel de Martonne. Período 1993 - 2014. Fuente de datos: SMN (2019), SIPHN (2019), INTA (2019), IADIZA (2019).

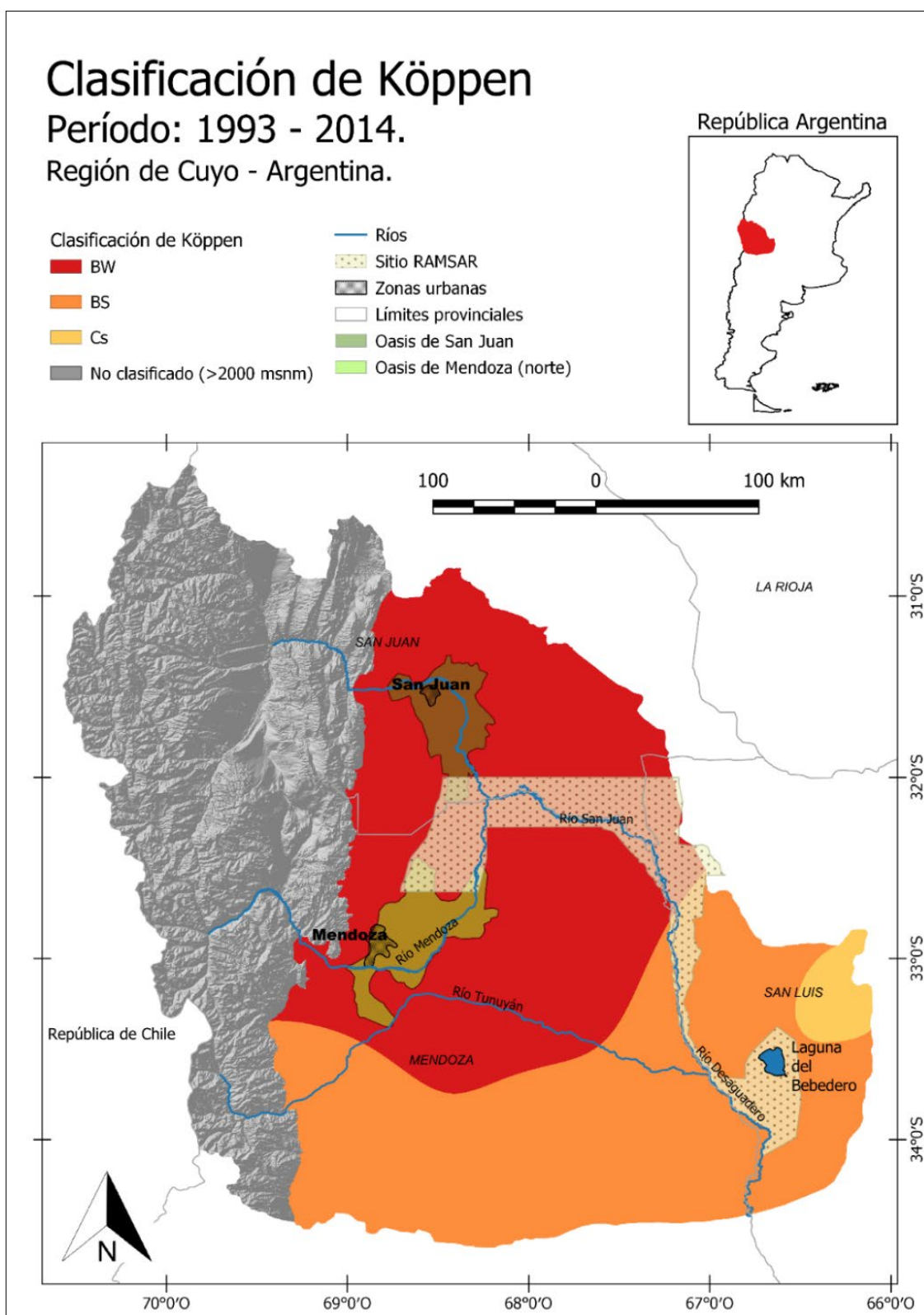


Figura 3. 19. Clasificación climática basada en temperatura y precipitación según el método de Köppen. Período 1993 - 2014. Fuente de datos: SMN (2019), SIPHN (2019), INTA (2019), IADIZA (2019).

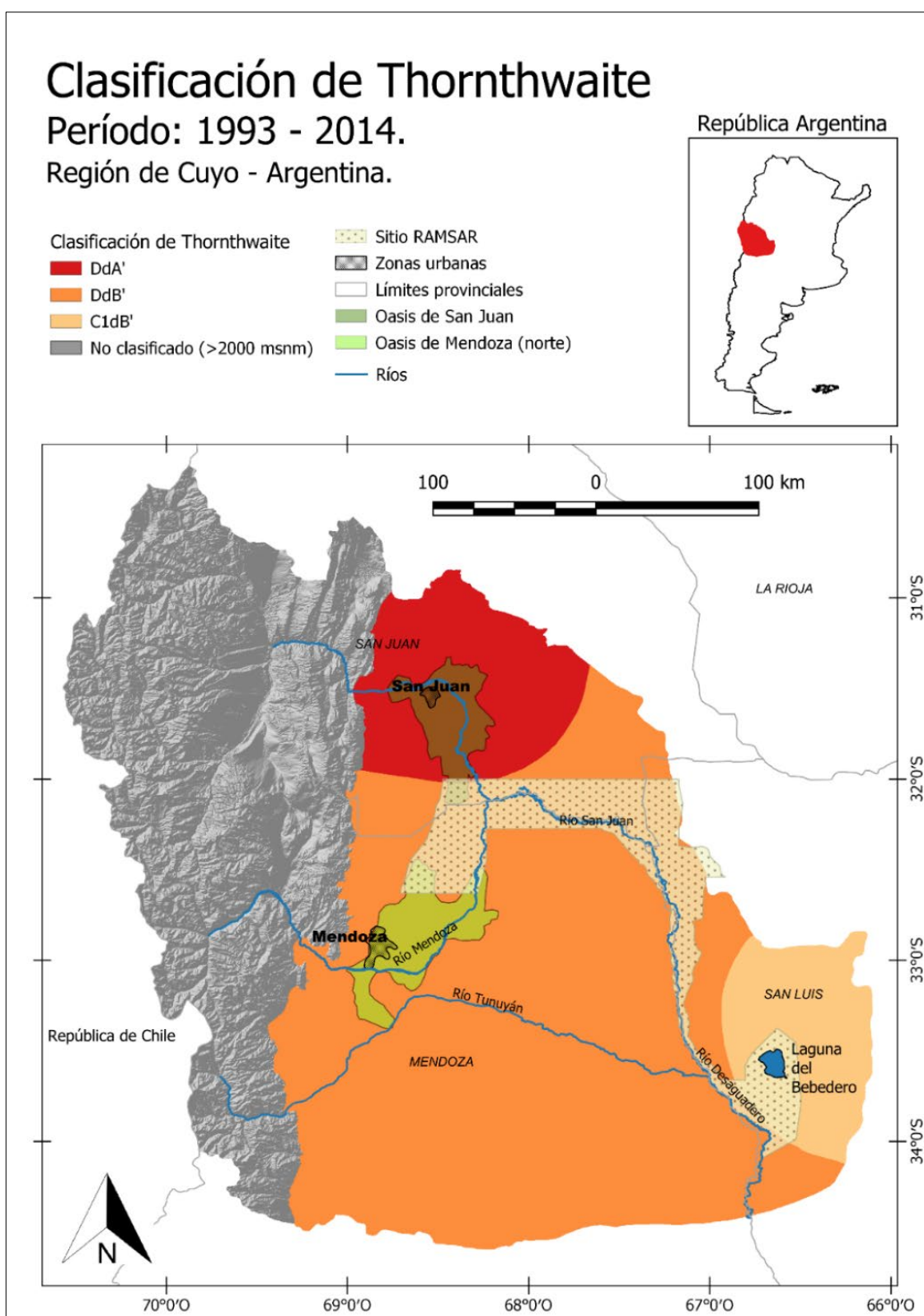


Figura 3. 20. Clasificación climática basada en temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial según el método de Thornthwaite. Período 1993 - 2014. Fuente de datos: SMN (2019), SIPHN (2019), INTA (2019), IADIZA (2019).

Por último, la clasificación de Holdridge (Figura 3.21) clasificando el territorio en función de las características de temperatura, precipitación, altitud y ETP, asigna una zona de vida potencial de acuerdo con dichas particularidades. De esta forma, el extremo árido norte (10 % del total) lo asigna a zonas de vida como: d-MB: desierto montano (0,3 %), d-PM: desierto premontano (5,3 %) y Md-PM: matorral desértico montano bajo (4,4 %), los cuales son tipologías vegetativas que potencialmente deberían existir bajo las condiciones de aridez de esa zona (donde característicamente se localiza el oasis y ciudad de San Juan).

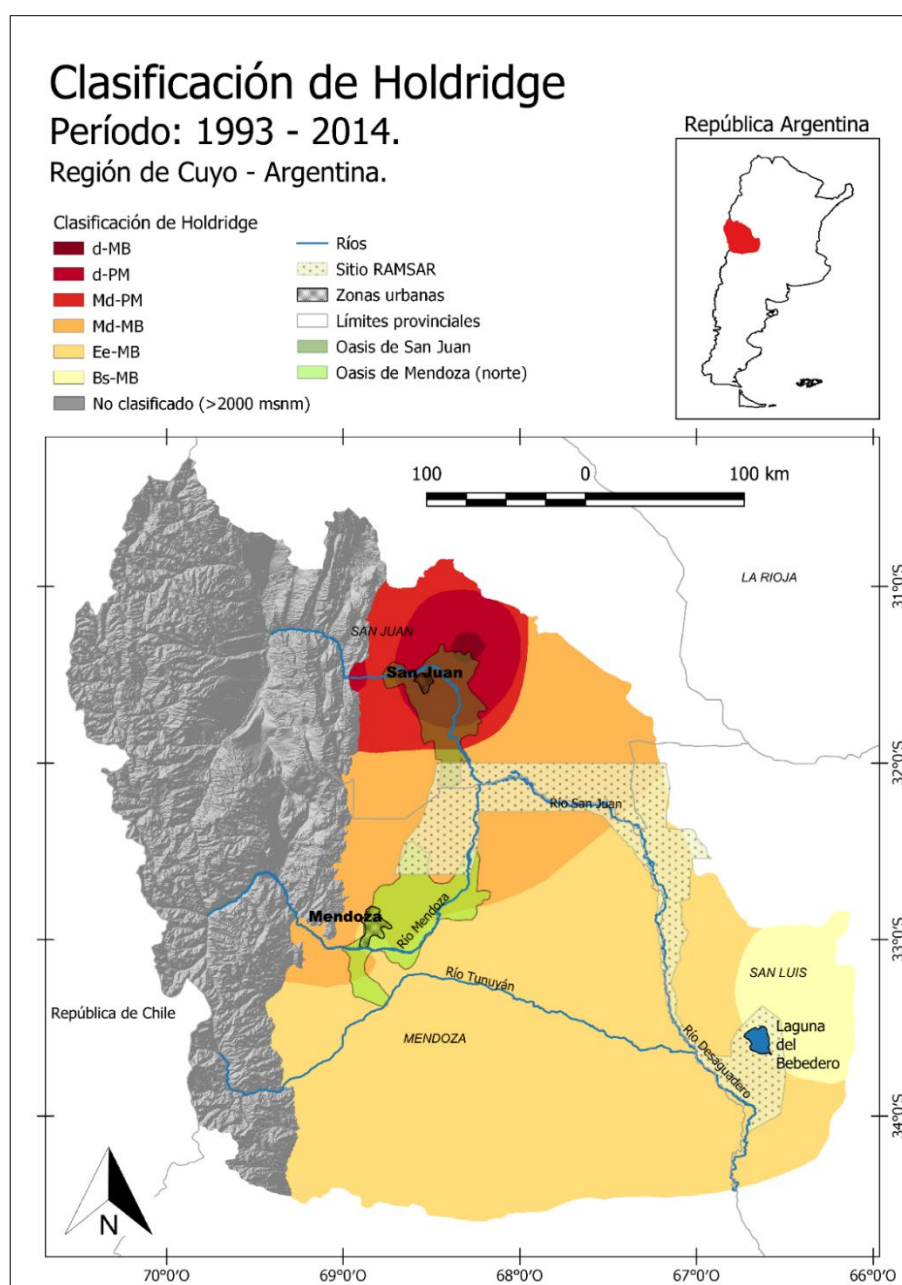


Figura 3. 21. Clasificación de zonas de vida basada en biotemperatura y precipitación según el método de Holdridge. Período 1993 - 2014. Fuente de datos: SMN (2019), SIPHN (2019), INTA (2019), IADIZA (2019).

Mediante Holdridge (1967), la porción centro norte la determina como Md-MB, o matorral desértico montano bajo (23,7 %), abarcando la porción norte del Ramsar y el oasis/ciudad de Mendoza. Más hacia el sur, la zona de vida Ee-Mb o estepa espinosa montano bajo (60 %) aparece con condiciones más húmedas y frescas, dejando el extremo este del Ramsar y de la región a la zona de vida Bs-MB, o bosque seco montano bajo (6,3 %), donde las temperaturas no sobrepasan los límites de 12 a 18 °C y las precipitaciones oscilan entre los 500 y 1.000 mm anuales.

Si bien el número y ubicación de las estaciones climáticas consideradas no es el óptimo deseable, la variabilidad espacial de los parámetros y consecuentes regímenes o clasificaciones generan un potencial visual a través de su interpolación en el territorio. La potencialidad de los mapas generados, radican en la visualización a una escala adecuada de la magnitud de estas variables en el espacio, dado que no hay antecedentes recientes que presenten estos resultados.

Estos mapas climáticos proporcionan más información de la zona de estudio, si se los compara con aquellos publicados en la literatura o en los organismos oficiales. Este es el caso de los publicados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2019), que se presentan en las Figuras [3.22](#) y [3.23](#). Dado que estos fueron interpolados a una escala aproximada de 1:25.000.000, por lo que no precisan exactitud espacial, ni otorgan muchos detalles acerca de la cantidad de estaciones ni longitud de registros que fueron usados para su confección.

El SMN (2019) presenta un mapa de temperatura media anual para el período 1981 – 2010 (Figura [3.22](#)). La subfigura de la derecha muestra temperaturas que varían de este a oeste como: > 18 °C, entre 18 y 16 °C y < 16 °C respectivamente. Comparando con la Figura [3.22](#) principal, se observa que la isoterma de 16 °C concuerda aproximadamente con la de la presente investigación (Figura [3.15](#)), no siendo así para las demás isotermas, que se muestran con otras variaciones espaciales diferentes a las confeccionadas en esta investigación con datos más actuales (Figura [3.15](#)).

Los resultados obtenidos en este capítulo concuerdan con el Servicio Meteorológico Nacional, pero además amplían el detalle del patrón de la precipitación media anual de la zona de estudio. La precipitación media anual publicada por el SMN (2019) se muestra en la Figura [3.23](#). Se observa un gradiente pluviométrico negativo de este a oeste y de sur a norte como se discutió en el análisis de la Figura [3.16](#). Sin embargo, las fajas pluviométricas que se logran observar registran precipitaciones > 500 mm para el extremo sureste de la zona de estudio y marca la isoyeta de 300 mm en el tercio sureste del área, coincidiendo con lo señalado en la Figura [3.16](#). Adicionalmente, muestra que la isoyeta de 200 mm incursiona unos kilómetros al sur del límite entre San Juan y Mendoza (cuando en la Figura [3.16](#) se evidencia que esta isoyeta se ubica sólo dentro de la porción sanjuanina). Por último, deja la isoyeta de 100 mm en un lugar coincidente con el mostrado en la Figura [3.16](#) (cerca del oasis/ciudad de San Juan).

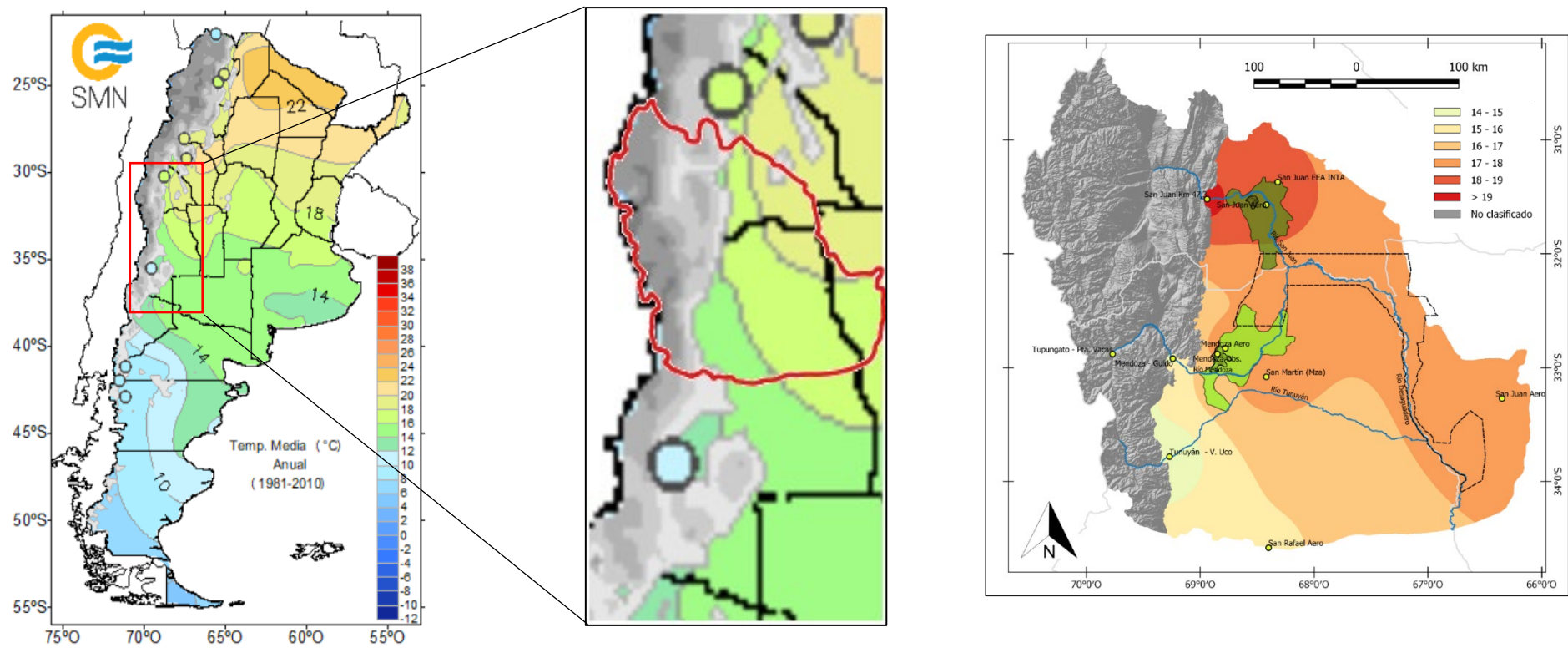


Figura 3. 22. Temperatura media anual de Argentina a escala $\approx 1:25.000.000$. Período 1981 – 2010 (SMN, 2019). La línea roja en la subfigura de la derecha indica el perímetro de la zona de estudio. A la derecha, mapa de referencia a la Figura 3.15 y como contraste al mapa del SMN (2019).

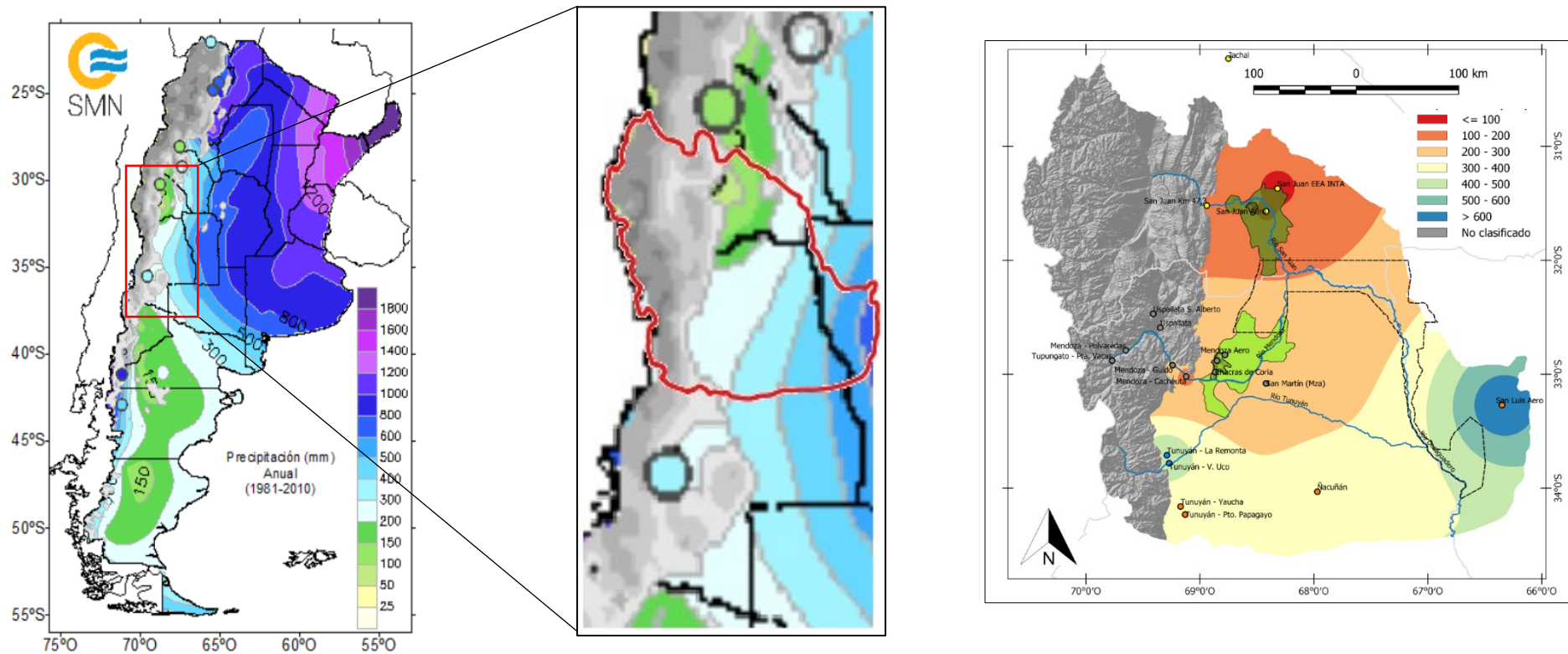


Figura 3. 23. Precipitación media anual de Argentina a escala $\approx 1:25.000.000$. Período 1981 – 2010 (SMN, 2019). La línea roja en la Figura de la derecha indica el perímetro de la zona de estudio. A la derecha, mapa de referencia a la Figura 3.16 y como contraste al mapa del SMN (2019).

Adicional a los mapas proporcionados por el SMN (2019), existen otros recientes (Figuras 3.24 y 3.25), publicados por Bianchi y Cravero (2010), los cuales utilizaron un modelo de regresión lineal para la estimación de la temperatura media mensual del aire en Argentina. Dicha regresión fue generada a partir de la altitud, la latitud y la precipitación anual.

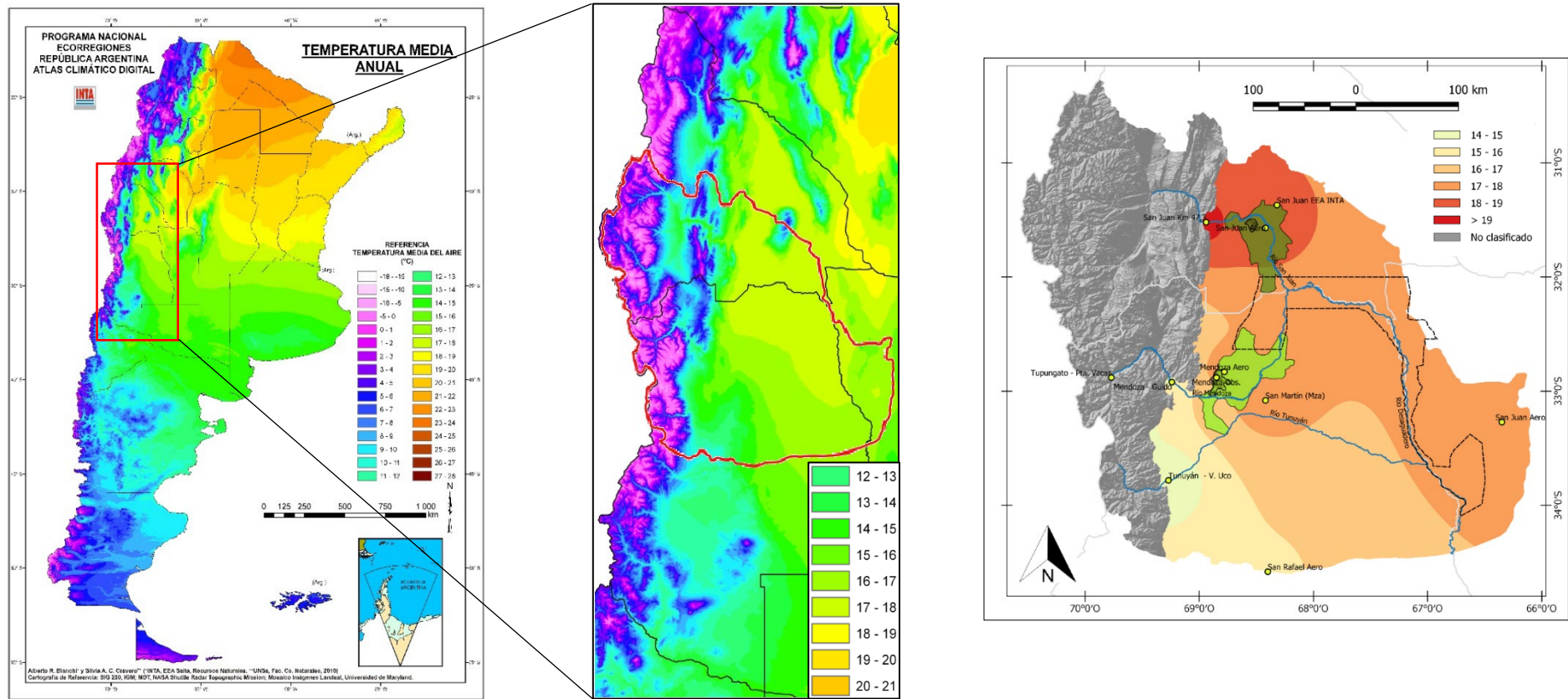


Figura 3. 24. Temperatura media anual de Argentina a escala $\approx 1:8.000.000$ (Bianchi y Cravero, 2010). La línea roja en la Figura de la derecha indica el perímetro de la zona de estudio. A la derecha, mapa de referencia a la Figura 3.15 y como contraste al mapa de Bianchi y Cravero (2010).

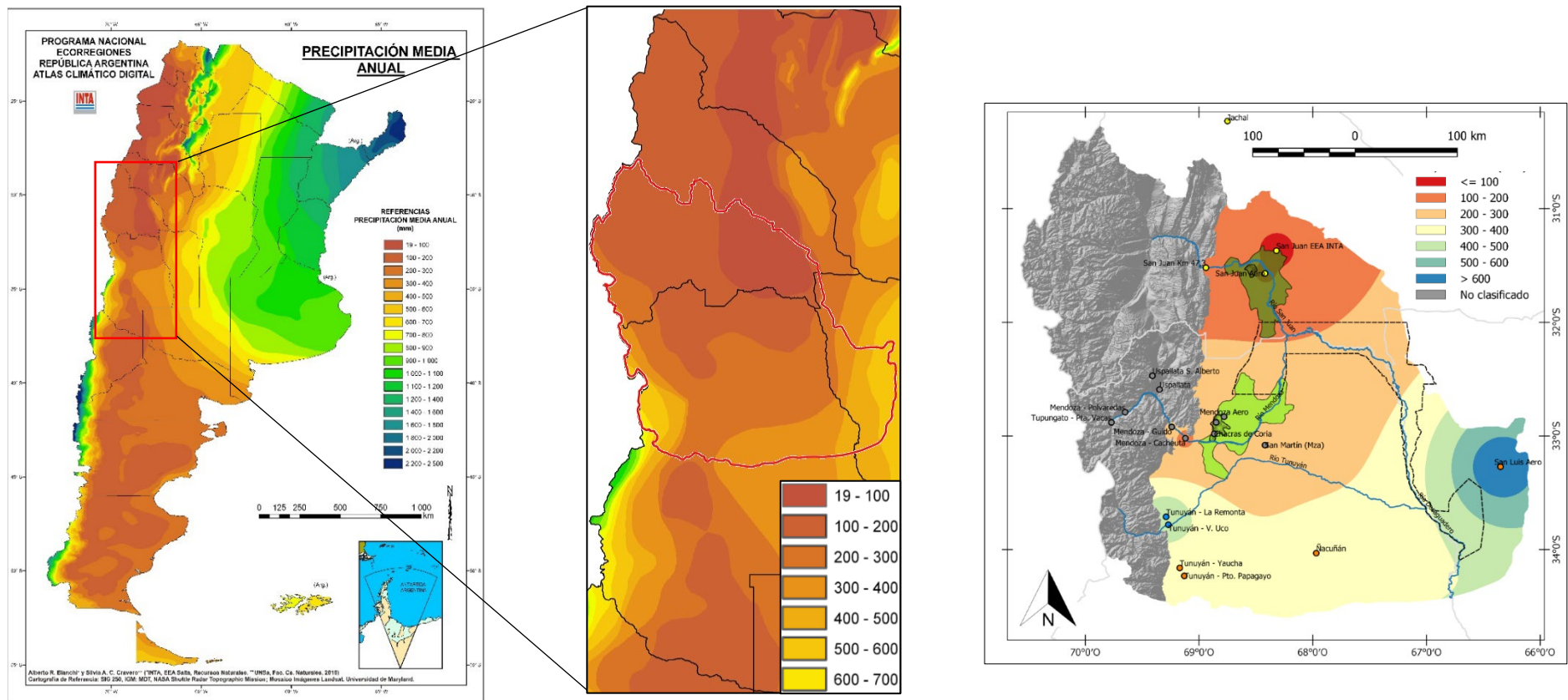


Figura 3. 25. Precipitación media anual de Argentina a escala $\approx 1:8.000.000$. (Bianchi y Cravero, 2010). La línea roja en la Figura de la derecha indica el perímetro de la zona de estudio de la presente investigación. A la derecha, mapa de referencia a la Figura 3.16 y como contraste al mapa de Bianchi y Cravero (2010).

Si bien la distribución de la temperatura media anual (Figura [3.24](#)) es relativamente similar a la mostrada en la Figura [3.15](#) (gradiente negativo de las temperaturas de este a oeste y de norte a sur), sobreestima las magnitudes de éstas en 1 °C. La estimación no tomó en cuenta las particularidades físicas del medio, ocasionando que presente inconsistencias respecto a la información mostrada en la Figura [3.15](#).

Por su parte, los mismos autores (Bianchi y Cravero, 2010) presentaron un mapa (Figura [3.25](#)) de precipitación media anual, el cual, según Cravero et al. (2017), fue conformado de acuerdo con estadísticas mensuales del período 1921 – 1950 aportadas por el SMN, recopilación de datos pluviométricos del noroeste argentino y estadísticas climáticas del SMN de la década de 1991 – 2000, además de otros datos (no mencionados) de la base de datos hidrológica integrada de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina. Adicionalmente, complementaron los vacíos limítrofes con datos aportados por el modelo *Worldclim* (sin mencionar el período ni las zonas consideradas).

La mayoría de las precipitaciones en el área, de acuerdo con Bianchi y Cravero (2010), tienen una magnitud inferior a los 600 mm, los cuales disminuyen de este a oeste y de sur a norte (Figura [3.25](#)). Las máximas, al igual que en la Figura [3.16](#), ocurren en el extremo sureste (San Luis), mientras que las mínimas (< 100 mm) se localizan al noreste (provincia de San Juan). Si bien las similitudes del mapa de la Figura [3.25](#) con la Figura [3.16](#) son considerables, los autores (Bianchi y Cravero, 2010) difieren colocando la isoyeta de 200 mm al sur del límite entre Mendoza y San Juan, cuando en la Figura [3.16](#) se observa que la misma se circunscribe a la provincia de San Juan (donde se encuentran las mínimas). Esto además entra en conflicto con varios autores como Albiol (2014) y Albiol (2018), que estiman las precipitaciones en el aeródromo de Mendoza en más de 200 mm al año.

Si bien las coincidencias son notables, posiblemente las diferencias entre ambos mapas (Figura [3.25](#) versus Figura [3.16](#)) ocurran debido a que los autores del primero tomaron en cuenta otro período de estudio, varias bases de datos (incluidas de modelos) y otros procesos de interpolación/estimación que no detallan con profundidad en su trabajo.

CONCLUSIÓN

El área de estudio, inmersa en la región cuyana argentina y a su vez, dentro de la diagonal árida suramericana, representa una de las zonas más secas y variables de la República Argentina. La influencia de la elevada cordillera andina y de su posición geográfica en el continente hacen que sus características climáticas sean particularmente propias. La naturaleza, a lo largo de su historia, ha evolucionado para adaptarse al medio, sin embargo, el ser humano, en búsqueda de su propia estabilidad, se ha asentado en ciudades y ha construido oasis en el desierto, con el fin de adaptarse a la aridez del lugar.

San Juan y Mendoza, dos de las principales ciudades del oeste argentino, comparten características de su medio en particular, teniendo como elemento común una vasta zona, aguas abajo y protegida internacionalmente por los otrora ricos humedales de zonas áridas en Guanacache. Estas zonas, con alta concentración de precipitaciones, elevada variabilidad anual y mensual de lluvias y temperaturas y un marcado gradiente espacial de los mismos (de este a oeste y de sur a norte) comparten casi en común en las zonas bajas la forma unimodal de sus regímenes de lluvias, con mayores valores (tanto de precipitación como temperatura) en verano y mínimas de las mismas en invierno (donde existe mayor variabilidad térmica).

Con ambientes áridos, donde casi la mitad del territorio del sitio Ramsar se encuentra por debajo de la isoyeta de 300 mm, la demanda evapotranspirativa potencial es elevada (1.191,5 mm en la sección norte del sitio Ramsar) y en la mayoría de los casos, casi cuatro veces superior a la oferta pluviométrica, por lo que cobran mayor importancia los escurrimientos superficiales y subsuperficiales que bajan desde la cordillera.

En cuanto a las pruebas estadísticas aplicadas a las series climáticas, todas las estaciones registraron aleatoriedad, independencia y homogeneidad significativa (ésta última prueba con excepción no significativa en 4 de las 21 estaciones consideradas). Finalmente, se constató la ausencia de tendencia o cambios graduales para las estaciones en el período considerado.

Haciendo especial énfasis en el sitio Ramsar de protección internacional, el mismo posee una media térmica de 17,4 °C y un promedio de precipitaciones anuales de 287,4 mm, siendo de esta forma más húmedo y fresco que otras zonas más al este y norte. Sin embargo, dado que los valores pluviométricos siguen siendo bajos para pretender mantener un humedal, es de especial importancia conocer dónde se encuentran los principales polos de desarrollo y hábitat humano, los cuales tienen condiciones más cálidas y secas que el humedal mismo, siendo la situación aún más acentuada en San Juan, donde se registran incluso menos de 100 mm de precipitación en promedio al año.

En cuanto a los índices, la mayor parte del área, incluyendo los oasis, ciudades y hasta el 75 % del Ramsar, presentan condiciones áridas o muy áridas, siendo catalogadas como desérticas por Köppen, semiáridas meso o megatérmicas (Thornthwaite) y de bajo desarrollo vegetativo potencial de acuerdo con

Holdridge. Sectorialmente y de acuerdo con los índices de Lang y de Martonne, el norte del sitio Ramsar es más árido que el sur.

Asimismo, mediante la comparación de los resultados obtenidos con mapas climáticos oficiales (Servicio Meteorológico Nacional - SMN), se encontraron similitudes y diferencias, generalmente derivadas de la escala de análisis (de mayor detalle por parte del presente estudio). Adicionalmente, las diferencias con otros mapas derivados del SMN (Biachi y Cravero, 2010) se vinculan al uso en éstos de modelos lineales para estimación de temperaturas y precipitaciones.

Finalmente, la relación de los resultados hallados con los encontrados por otros autores revela las carencias hídricas promedio de la región, siendo necesario, a posteriori, enfocar mayor atención en cómo estas condiciones varían en el tiempo y cómo afectan a los caudales que escurren desde la cordillera, los cuales son necesarios para satisfacer las altas demandas humanas en las ciudades y oasis, así como también, aguas abajo, en los ricos humedales del Ramsar, actualmente en declive.

REFERENCIAS

Addinsoft, (2016). XLSTAT statistical and data analysis solution. Versión 2016.02.28451. Long Island, NY, USA. <https://www.xlstat.com>

Albiol, C. (2014). Análisis de las precipitaciones de Mendoza entre 1970 y 2010: variabilidad, tendencia y comportamiento cíclico. X Jornadas Nacionales de Geografía Física, Malargüe. Instituto de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Red Argentina de Geografía Física. Mendoza. Argentina.

Albiol, C. (2018). Aplicación de criterios para la identificación de precipitaciones extremas en los oasis mendocinos, 1970 – 2010. *Vientos del Norte*, 6(2).

Almorox, J. Quej, V. y Martí, P. (2015). Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. *J Hydrol*, v. 528, 514-522.

Al-Zamili, H. y Al-Lami, A. (2018). Assessment of spatial distributions of some climate indices in Iraq. *Journal of Applied and Advanced Research*, 2018: 3(4) 96–104.

Aparecido, L. de Souza, G. Richetti, J. de Souza, P. y Adriani, J. (2016). Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia* 40(4):405-417, Jul/Aug. 2016.

Arachchige, C. (2019). Confidence intervals for median absolute deviations. arXiv:1910.00229v4 [math.ST]. Consultado de: <https://arxiv.org/pdf/1910.00229.pdf>

Arnfield, J. (2019). Köppen climate classification. *Encyclopædia Britannica*, inc. april 11, 2019. <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>

- Asfaw, A. Simane, B. Hassen, A. y Bantider, A. (2019). Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. *Weather and Climate Extremes* 19 (2018) 29-41. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.12.002>
- Bae, I. y Ji, U. (2019). Outlier Detection and Smoothing Process for Water Level Data Measured by Ultrasonic Sensor in Stream Flows. *Water* 2019, 11(5), 951. Doi: <https://doi.org/10.3390/w11050951>
- Bastidas, L. Vich, A. y Piccolo, M. (2020). Propuesta metodológica para completar series de tiempo mensuales de temperatura cuando no existen estaciones adyacentes. *Investigaciones Geográficas*. Núm. 103. Doi: <https://doi.org/dx.doi.org/10.14350/rig.6003>
- Bastidas, L. Vich, A. y Piccolo, M. (2021). Similarity assessment and adjustment of integrated temperature databases. Cuyo region, Argentina. *Investigaciones Geográficas*. Núm. 105. Doi: <https://dx.doi.org/10.14350/rig.60274>
- Beck, H. Zimmermann, N. McVicar, T. Vergopolan, N. Berg, A. y Wood, E. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci. Data*. 5:180214.
- Bianchi, A. y Cravero, S. (2010). Atlas climático digital de la República Argentina. Ediciones Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria. INTA, Centro Regional Salta Jujuy.
- Borovic, S. Terzic, J. y Pola, M. (2019). Groundwater Quality on the Adriatic Karst Island of Mljet (Croatia) and Its Implications on Water Supply. *Geofluids* (2019): 14.
- Bruniard, R. (1982). La diagonal árida argentina: un límite climático real. *Revista Geográfica*. 95 (1982). Pp 5 – 20.
- Bugrayhan, B. y Kahya, E. (2019). Homogeneity revisited: analysis of updated precipitation series in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology* (2019) 135:211-220.
- Camisay, M. Rivera, J. Mateo, M. Morichetti, P. y Mackern, M. (2020). Estimation of integrated water vapor derived from Global Navigation Satellite System observations over Central-Western Argentina (2015–2018). Validation and usefulness for the understanding of regional precipitation events. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. Volume 197. ISSN 1364-6826. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105143>
- Capitanelli, R. (1967). Climatología de Mendoza. *Boletín de Estudios Geográficos*. Nº 54-57, Vol XIV.
- Carifio, J. y Perla, R. (2008). Resolving the 50-year debate around using and misusing Likert scales. *Medical Education*, 42, 1150–1152.
- Castaneda-Gonzalez, M. Poulin, A. Romero-Lopez, R. y Arsenault, R. Brissette, F. y Turcotte, R. (2018). Sensitivity of seasonal flood simulations to regional

climate model spatial resolution. *Climate Dynamics*. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04789-y>

Chowdhury, A. (2018). Assessment of intensity and distribution of aridity over Bangladesh using different climate indices with GIS. *Discovery Publication* 4(16).

Clifford, N. French, S. Valentine, G. (2010). *Key Methods in Geography*. Sage. Segunda edición. Londres

Compagnucci, R. (1988). *Climatología sinóptica de las precipitaciones en Cuyo*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Cravero, S. Bianchi, C. Elena, H. y Bianchi, A. (2017). *Clima de Argentina. Mapas digitales mensuales de precipitación y precipitación menos evapotranspiración potencial*. Adenda del atlas climático digital de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. Ministerio de Agroindustria. Salta, Jujuy.

De Jesús, D. (2014). *Material Instruccional. Guía didáctica de la asignatura Climatología*. Departamento de Geografía Física. Escuela de Geografía. Universidad de Los Andes. Mérida - Venezuela.

De Luis, M. Brunetti, M. Gonzalez-Hidalgo, J. Longares, L. y Martin-Vide, J. (2010). Changes in seasonal precipitation in the Iberian Peninsula during 1946-2005. *Global and Planetary Change* 74 (2010) 27-33.

De Medeiros, R. Morant de Holanda, R. Viana, M. y Silva, V. (2018). Climate classification in Köppen model for the state of Pernambuco - Brazil. *Revista de Geografia (Recife)* V. 35, No. 3.

Duarte, A. Da Silva, C. Das Chagas, F. Oliveira, S. y Ferreira, J. (2018). Classificação Climática de Thornthwaite para o Brasil com Base em Cenários de Mudanças Climáticas do IPCC-AR5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 4, 647-664, 2018.

Duque, R. (1980). *Precipitación, formación, medición y análisis de datos*. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 57 p.

Duque, R. (1985) *Formación, medición y análisis de datos*. Serie Hidrología H-21, CIDIAT.

Ghalem, A. Barbosa, I. Tarik, R. y Costa, A. (2018). Climate signal in cork-ring chronologies: case studies in Southwestern Portugal and northwestern Algeria. *Tree-Ring Research*, 74(1), 2018, pp 15-27.

Gómez, C. y Ochoa, D. (2011). Señales de cambio climático en series de lluvia en Antioquia. In: IX Congreso Colombiano de Meteorología, 23-25 de Marzo, Bogotá D.C. Colombia.

González-Hidalgo, J. Brunetti, M. y De Luis, M. (2010). A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-November 2005). *Int. J. Climatol.* 31: 715-731 (2011).

- Guevara, J. (2003). Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Segunda edición. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Haider, S. y Adnan, S. (2014). Classification and assessment of aridity over Pakistan provinces (1960-2009). *International Journal of Environment*, 3(4), 24-35.
- Helsel, D. y Hirsch, R. (2002). *Statistical methods in water resources. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation. U.S. Geological Survey*
- Henshu, L. Dong, W. Vijay, S. Yuankun, W. Jianfeng, W. Jichun, W. Jiufu, L. Ying, Z. Ruimin, H. y Jianyun, Z. (2019). Non-stationary frequency analysis of annual extreme rainfall volume and intensity using Archimedean copulas: A case study in eastern China. *Journal of Hydrology* 571 (2019) 114-131.
- Holdridge, L. (1967). *Life Zone Ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. Ecología Basada en Zonas de Vida. 1a. ed. San José, Costa Rica: IICA, 1982.*
- Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas, IADIZA. (2019). Red Ambiental IADIZA. Consultado de: https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/red_iadiza/index.htm
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA. (2019). Sistema de información y gestión agrometeorológica – SIGA. Consultado de: <http://siga2.inta.gov.ar/#/>
- Ioan, V. Beilicci, R. y Beilicci, E. (2019). Evolution in Time (1980-2014) of Drought Based on Several Computation Indexes. Case Study of Banloc, Romania. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng* 471(2019).
- Jamieson, S. (2004). Likert scales: How to (ab)use them. *Medical Education*, 38, 1212–1218.
- Kassambara, A. (2017). Package 'factoextra'. R Package to Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. Consultado de: <http://www.sthda.com/english/rpkgs/factoextra>
- Knoben, W. Wood, R. y Freer, J. (2018). A Quantitative Hydrological Climate Classification Evaluated with Independent Streamflow Data. *Water Resources Research*. 54(7), 5088-5109.
- Köppen, W. (1936). *Das geographische System der Klimate. Gebrüder Borntraeger: Berlin, Germany. 1 - 44.*
- Lauro, C. (2016). Estudio del comportamiento del régimen fluvial de las cuencas del oeste argentino y su vinculación con el cambio climático. Tesis doctoral para optar al título de Doctor en Ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina.

- Leys, C. Ley, C. Klein, O. y Bernard, P. (2013). Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology* 49(4):764–766. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013>
- Li, H. Wang, D. Singh, V. y Wang, Y. (2019). Non-stationary frequency analysis of annual extreme rainfall volume and intensity using Archimedean Copulas: A case study in eastern China. *Journal of hydrology*. ISSN: 0022-1694. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.054>
- Maggi, S. Bruno, D. Lay-Ekuakille, A. Masciale, R. y Passarella, G. (2018). Automatic processing of bioclimatic data in the space and time domains. XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018). *Journal of Physics: Conf. Series* 1065 (2018).
- Martinovska, A. Hristov, J. y Surry, Y. (2019). Farm response to climate change: exploratory analysis of Macedonian agriculture using the ricardian modeling approach. *Natural, Mathematical and Biotechnical Sciences, MASA*, (2019):40, 105-114.
- Miller, J. (1991). Reaction time analysis with outlier exclusion: Bias varies with sample size. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 43(4), 907–912. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/14640749108400962>
- Mo, R. Ye, C. y Whitfield, P. (2013a). Application Potential of Four Nontraditional Similarity Metrics in Hydrometeorology. *Journal of Hydrometeorology*. Volume 15.
- Mo, R. Ye, C. y Whitfield, P. (2013b). Some Similarity Indices with Potential Meteorological Applications. NOAA's 38th Climate Diagnostics and Prediction Workshop. Technical Report, No. 2013-002. National Laboratory for Coastal and Mountain Meteorology, Canada.
- Najundan, S. Sankaran, S. Arjun, C. y Anand, P. (2019). Identifying the number of clusters for K-Means: A hypersphere density based approach. Department of Computer Science and Engineering SRM. Institute of Science and Technonology. Chennai, India. Consultado de: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1912/1912.00643.pdf>
- Naranjo, M. y Duque, R. (2004). Estimación de la oferta de agua superficial y conflictos de uso en la cuenca alta del río Chama. *Interciencia*, vol. 29, núm. 3, marzo, 2004, pp. 130-137. Mérida, Venezuela.
- Neira, M. (2010). Assessment of climate indices in dry lands of Colombia. 13 - 16 December 2010 Valparaíso, Chile. p. 70.
- Norte, F. (1996). Mapa climático de Mendoza. Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina argentina. Caracterización general y estudios temáticos por provincia. Consultado de: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap03.htm#inhalt>
- Paulhus, J. y Kohler, M. (1952). Interpolation of missing precipitation records: U.S. Weather Bur. *Monthly Weather Rev.*, v. 80, p. 129-133.

- Pettitt, A. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, Leics, England, 28(2): 126-135
- Radakovic, M. Tomic, I. Bacevic, N. Mladjan, D. Gravidov, M. y Markovic, S. (2018). The analysis of aridity in Central Serbia from 1949 to 2015. *Theor Appl Climatol* (2018) 133:887-898.
- Rivera, J. Hinrichs, S. y Marianetti, G. (2019). Using CHIRPS Dataset to Assess Wet and Dry Conditions along the Semiarid Central-Western Argentina. *Advances in Meteorology*. Volume 2019.
- Rivera, J. y Penalba, O. (2017). Distribución de probabilidades de los caudales mensuales en las regiones de Cuyo y Patagonia (Argentina). *Aplicación al monitoreo de sequías Hidrológicas*. Meteorológica.
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2019). Estadísticas climáticas normales. Servicios climáticos. Consultado de: <http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos>
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2019b). Atlas Climático Argentina. Página web en línea. Consultado el 05 de agosto de 2019, de: <https://www.smn.gov.ar/clima/atlasclimatico>
- Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación, SIPHN. (2019). Base de datos hidrológica integrada. Consultado de: <http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/>
- Spinoni, J. (2014). Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen-Geiger classification and FAO aridity index. *International Journal of Climatology*. 35:2210-2222, 2014.
- Talchabhadel, R. y Karki, R. (2019). Assessing climate boundary shifting under climate change scenarios across Nepal. *Environ Monit Assess* (2019) 191:520.
- Tapiador, F. Moreno, R. Navarro, A. Sánchez, J. y García-Ortega, E. (2019). Climate classifications from regional and global climate models: Performances for present climate estimates and expected changes in the future at high spatial resolution. *Atmospheric Research*. Volume 228, 1 November 2019, Pages 107-121. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.022>
- Thornthwaite, W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*. 38:55-94.
- Thornthwaite, W. y Mather, J. (1955). The water balance. *Publications in Climatology*, 8(1), 104-114.
- Von Neumann, J. (1941). Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *Ann Math Stat* 13:367-395.
- Wanderson, L. Nóbrega, L. Piñeirom M. y Corrêa, O. (2018). Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants. *Theoretical and Applied Climatology* (2019) 137:353-371.

Zarei, A. Shabani, A. y Mahmoudi, M. (2019). Comparison of the climate indices based on the relationship between yield loss of rain-fed winter wheat and changes of climate indices using GEE model. *Science of the Total Environment* 661 (2019) 711-722.

Zeroual, A. Assani, A. Meddi, M. y Alkama, R. (2018). Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen-Geiger climate classification scheme. *Climate Dynamics*.

Zhang, L. Traore, S. Cui, Y. Luo, Y. Zhu, G. Liu, B. Fipps, G. Karthikeyan, R. y Singh, V. (2019). Assessment of spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and controlling climate factors over decades in China using geospatial techniques. *Agricultural Water Management* 2013 (2019) 499 – 511.

Capítulo IV

VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA

INTRODUCCIÓN

Las características áridas de la región cuyana donde se ubica el sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero es producto de los factores climáticos que caracterizan la zona, entre otros factores. Esto ocasiona que la región sea especialmente susceptible a la variabilidad climática en sus diferentes escalas, espaciales y temporales. El concepto de variabilidad climática hace referencia a las variaciones temporales de los parámetros meteorológicos respecto a sus medias en el tiempo. En este sentido, representa un hecho climático temporal y transitorio, cuyas causas pueden tener orígenes naturales (p. ej., cambios en la órbita terrestre, cambios de flujo energético solar, erupciones volcánicas) o antrópicos (efecto invernadero) (Zotelo, 2011; IDEAM, s/f; Weather, 2018; IPCC, 2021).

Dependiendo de la localización del sitio, las anomalías observadas en los diferentes parámetros son de diversa magnitud, incluyendo los eventos extremos. Las anomalías pueden ser negativas o positivas y se las debe estudiar en el tiempo.

Sumado a las variables climáticas y como preámbulo temático de este capítulo, el prefijo “hidro” se añade haciendo referencia a la variabilidad hidrológica que presentan los caudales de los ríos analizados en la zona de estudio Ramsar. De esta manera y como parte de la variabilidad hidroclimática, el análisis se establece principalmente hacia las variables medias diarias de precipitación, temperatura y caudal.

La importancia del estudio de la variabilidad climática permite analizar el rango de los umbrales naturales entre los que se calculan las anomalías hidroclimáticas. Así, la existencia de eventos extremos, aislados o cíclicos puede diferenciarse de procesos que induzcan a tendencias de cambio sistemático en el tiempo, como lo constituye la variabilidad natural del clima. Como referencia a este último punto, dichas tendencias pueden hacer alusión al concepto de cambio climático, cuyo origen (natural o inducido por causas antrópicas) permite que tanto las medias hidroclimáticas como los umbrales de anomalías referidas sean distintas a largo plazo (Wagena et al., 2018; IPCC, 2021; Grafton y Wittwer, 2021)

En este sentido, es importante resaltar que la variabilidad hidroclimática es un hecho permanente, donde las fluctuaciones climáticas varían dentro del corto plazo (meses a décadas), referido al valor medio de una larga serie temporal. Si bien los impactos de dichas variaciones pueden tener manifestaciones (en general) negativas en sistemas socioeconómicos, su manifestación

espaciotemporal de origen natural es vital para los ecosistemas (Xu et al., 2021; Moustahfid et al., 2021; Romero et al. 2022), por lo que cobra especial énfasis su estudio y comprensión (p. ej., ciclos de sequías, ocurrencia de períodos lluviosos extraordinarios, inundaciones históricas, manejo del suelo, entre otros).

Las cuencas en la zona de estudio (Figura 4.1) fluyen de oeste a este conforme disminuye la altitud, siendo la cordillera andina el principal factor físico que regula sus caudales. De esta forma, los regímenes nivales de los ríos se acumulan durante el invierno en las secciones hidrográficas altas, permitiendo el aporte de escorrentía durante el resto del año a las zonas bajas (Masiokas et al., 2006). Adicionalmente, la interacción entre la cordillera y el componente océano-atmósfera y otros factores climáticos (p. ej., latitud, ángulo de declinación solar, continentalidad) representan los principales agentes físicos que definen las características climáticas y su variabilidad en la región (Masiokas et al., 2010; Rivera et al., 2014; Lauro, 2016).

Naturalmente, las variaciones en los regímenes de precipitación y caudales tienen relación estrecha con la definición de variabilidad climática, cuyas fluctuaciones inciden en las manifestaciones temporales y espaciales de estos (Lauro, 2016). El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2021) establece algunas diferencias entre variabilidad climática y cambio climático. Respecto al primer concepto, hace alusión a las variaciones de medidas estadísticas (p. ej., media, mediana, desviaciones, anomalías) en el tiempo y sin que incurran en una tendencia positiva o negativa prolongada. Por otra parte, y respecto al cambio climático, estas variaciones pueden tener tendencias progresivas y a largo plazo.

De esta forma, se entiende que tanto la variabilidad como el cambio climático son procesos naturales e inherentes a la heterogeneidad del sistema climático terrestre. Aunque en su mayoría las fluctuaciones temporales y espaciales pueden tener origen natural, las causas antrópicas tienen incidencia en dichas manifestaciones.

Diversos estudios han relacionado la variabilidad hídrica de ríos de la zona con la alternancia de eventos remotos, como El Niño – Oscilación del Sur (ENOS), cuyos episodios cálidos se correlacionan con aumentos en las precipitaciones níveas en la alta montaña y, por ende, en la producción de escorrentía (Compagnucci y Vargas, 1998). Asimismo, otros autores como Núñez et al. (2013) han desarrollado estudios similares para correlacionar la incidencia de otros índices oceánicos (p. ej., Oscilación Decadal del Pacífico – PDO) en la región.

Numerosas publicaciones se encuentran en la literatura con respecto a los regímenes hidrológicos de esta región (p. ej., Boninsegna y Villalba, 2006, Masiokas et al., 2010). Estos autores expusieron diversos ejemplos para analizar el comportamiento hídrico de ríos de la zona, incluyendo análisis de homogeneidad y de tendencias. En general, concuerdan en tendencias negativas (con disminución de caudales entre 50 y 60 %) en ríos como Mendoza,

Tunuyán y San Juan, inicialmente identificada desde inicios del siglo pasado y con énfasis hacia el final del siglo XX.

Las fluctuaciones de fenómenos como El Niño – Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO en inglés) y la Oscilación Antártica (OA) ejercen una notable influencia en la región de los Andes centrales, especialmente en la variabilidad hidroclimática interanual (Masiokas et al., 2006; Rivera et al., 2017; Lauro et al., 2019). El primero de estos fenómenos mencionados representa además una de las principales fuentes de variabilidad en la escala anual en el planeta (Timmerman et al., 2018; Grothe et al., 2020).

El objetivo general de este capítulo es analizar la variabilidad hidroclimática regional del sitio Ramsar, haciendo especial énfasis en los caudales aportantes desde la cordillera de los Andes.

METODOLOGÍA

El método de trabajo se orientó al análisis de series de tiempo de temperatura, precipitación y caudales medios diarios, provenientes de estaciones cercanas al humedal y que se detallan en la Tabla 4.1. Para dichas series, se realizaron análisis espectrales, estudios de anomalías mensuales y correlación con índices climáticos, como así también su vinculación con índices satelitales como el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (*NDVI Normalized Difference Vegetation Index*) (Pettorelli et al., 2005; Huang et al., 2021).

Las escalas temporales de análisis fueron desde meses a décadas, mientras que el alcance espacial se vincula a elementos regionales y continentales que pueden incidir de una u otra manera en la variabilidad hidroclimática local del humedal (p. ej., teleconexiones).

Se utilizaron datos medios mensuales (Tabla 4.1) de temperatura, precipitación y caudales medios diarios, brindados por la Base de Datos Hidrológica Integrada (SIPHN, 2019; INA-CRA, 2020). La mayoría de las estaciones se ubican aguas arriba del sitio Ramsar (Figura 4.1), las cuales difieren en número de las utilizadas en el Capítulo III, ya que se priorizó el uso de aquellas con la mayor longitud de datos disponibles (con fines de variabilidad climática).

Tabla 4. 1. Estaciones hidroclimáticas.

Variable	Estación	Código	Período	Rango (años)
Caudal (Q)	Desaguadero – Arco del Desaguadero	1424	07/2009 – 06/2019	10,0
	Mendoza – Guido	1413	07/1956 – 06/2019	63,0
	San Juan – El Encón	1219	07/1991 – 06/2019	27,9
	San Juan km 101	1211	10/1971 – 06/2019	47,7
	Tunuyán – Valle de Uco	1419	05/1954 – 06/2019	65,1
Temperatura (T)	Mendoza – Guido	1413	01/1993 – 12/2019	26,9
	Vacas – Punta de Vacas	1420	12/1992 – 12/2019	27,0
	San Juan km 47,3	1208	05/1993 – 09/2008	15,3

	San Juan km 101	1211	06/2010 – 12/2019	9,5
	Tunuyán – Valle de Uco	1419	03/1962 – 01/2020	57,9
Precipitación (P)	Mendoza - Guido	1413	02/1957 – 12/2019	62,9
	Vacas - Punta de Vacas	1420	12/1992 – 12/2019	27,0
	INA – CRA	-	10/1984 – 01/2020	35,3
	San Juan km 47,3	1208	01/1962 – 10/2008	46,8
	San Juan km 101	1211	06/2010 – 12/2019	9,5
	Tunuyán – Valle de Uco	1419	01/1955 – 12/2019	65,0

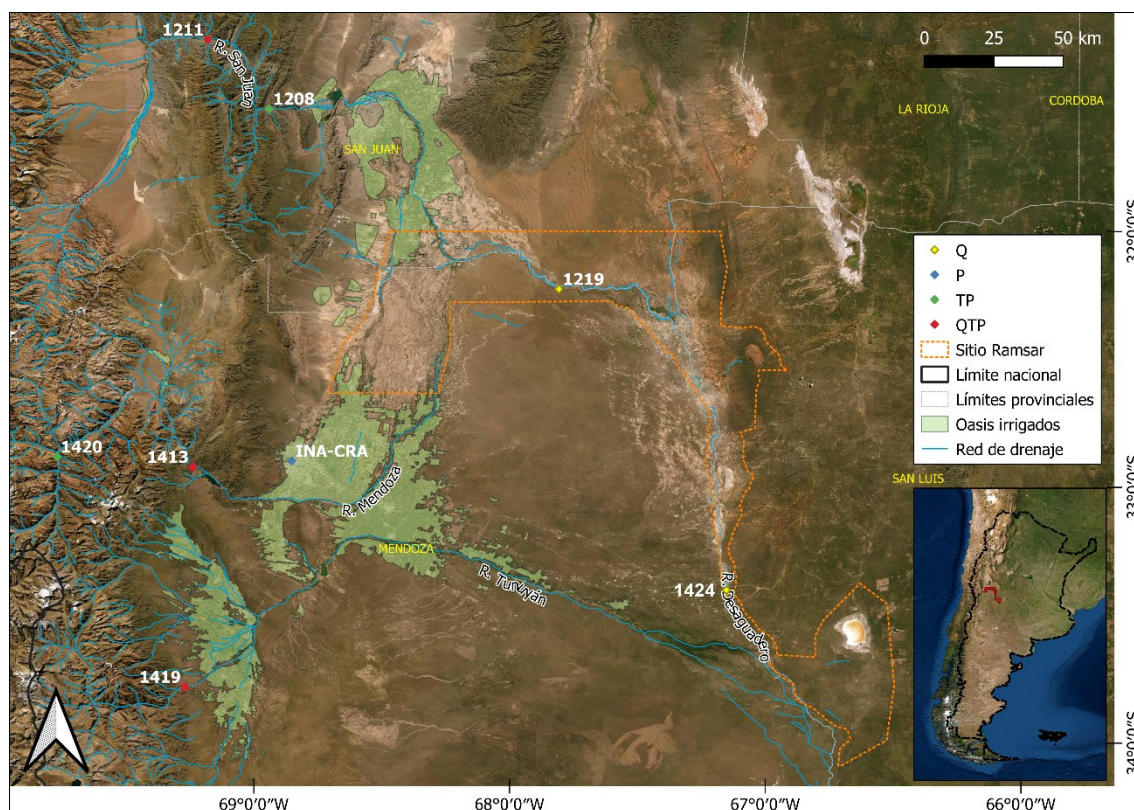


Figura 4. 1. Área de estudio y estaciones hidroclimáticas utilizadas. Q: caudal; P: precipitación; TP: temperatura-precipitación; QTP: caudal, temperatura, precipitación, 1219: San Juan–El Encón; 1605: Desaguadero–Salto de la Tosca; INA–CRA: Instituto Nacional del Agua–Consejo Regional Andino; 1420: Vacas–Punta de Vacas; 1208: San Juan km 47,3; 1211: San Juan km 101; 1413: Mendoza–Guido; 1419: Tunuyán–Valle de Uco (esta estación se ubica sobre un azud adyacente al río Tunuyán).

Análisis espectral

A través de la Transformada Rápida de Fourier (TRF) se permite convertir series temporales en señales de frecuencia, usadas generalmente para evaluar las potencias de recurrencia de eventos climáticos asociados a periodicidades influidas por la variabilidad climática (Beigt y Piccolo, 2011; Wharton y Falk, 2016; Nurdiati et al., 2021). Se calculó el periodograma, el cual permite transformar las series temporales en frecuencias. Usualmente, el acceso al periodograma se obtiene a través de la aplicación de la TRF, cuyos máximos de frecuencia reflejan la periodicidad respecto a una densidad espectral dada. La obtención de los periodogramas se realizó a través del software XLSTAT v. 2016.02.28451 (Addinsoft, 2016). En el periodograma, el eje X representa la cantidad de

variabilidad de la temperatura que está presente en una determinada frecuencia ($^{\circ}\text{C}^2 \text{ frecuencia}^{-1}$), y el eje Y representa la densidad espectral de potencia.

Dentro del análisis espectral, también fue aplicada la técnica de ondoletas (*wavelets*). Gallegati (2018) expresa que esta técnica se emplea como un proceso de análisis exploratorio de datos, cuyas ventajas radican en su flexibilidad para examinar datos sin preconceptos. De esta forma, permite visualizar estructuras subyacentes, variaciones de escalas y dependencias vinculadas a correlaciones. Por su parte, Estévez et al., (2020) establecen que la transformación por ondoletas representa una herramienta de procesamiento de señal poderosa, resultando ser útil para la identificación de teleconexiones entre diversos elementos de variabilidad climática (Rezaei y Gurdak, 2020). La confección de las ondoletas se ejecutó mediante el software Past. v. 3.25 - 2019 (Hammer et al., 2001).

Para este estudio, el uso de ondoletas se contrastó con los periodogramas para establecer relaciones de periodicidades de las variables estudiadas (p. ej., caudales, precipitación y temperaturas medias) en el tiempo. La definición de los periodogramas se estableció por medio del método de Tukey-Hanning y ponderación de Kernel.

Anomalías

El Centro Nacional para la Información Ambiental (NCEI, 2021) define las anomalías climáticas como la diferencia entre un registro dado y su promedio en un contexto temporal determinado (ecuación [4.1]). De esta forma, las anomalías permiten establecer la ocurrencia, magnitud y frecuencia de eventos climáticos que superen o se encuentren por debajo de los valores medios de referencia. Asimismo, el *National Centers for Environmental Information* (NCEI, 2021) expresa que bajo datos confirmados y de acuerdo con períodos de tiempo determinados, las fases de anomalías climáticas pueden tener significados y correlaciones con procesos y factores espaciales y temporales. En la Figura 4.2, las anomalías del índice de El Niño 3.4 permiten el establecimiento de las fases frías y cálidas de este modo de variabilidad climática de repercusión global.

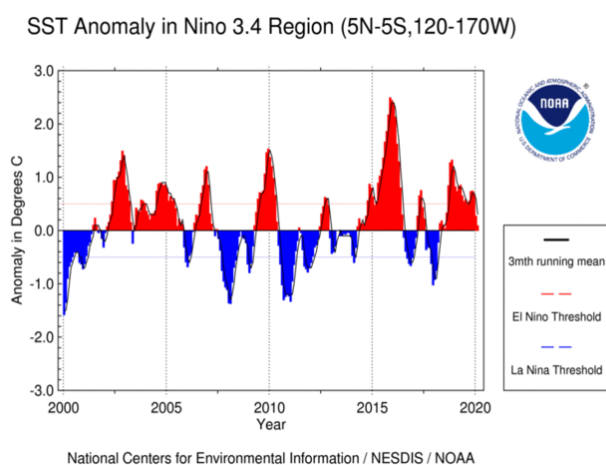


Figura 4. 2. Anomalías de la temperatura superficial del océano en la región Niño 3.4 (océano Pacífico ecuatorial) entre los años 2000 y 2020. Fuente: NCEI (2021b).

Para efectos del presente estudio, se calcularon anomalías mensuales y anuales en función de los datos mensuales de caudales, temperaturas y precipitaciones para los períodos y estaciones considerados en la Tabla 4.1.

$$\text{Anomalía} = X_i - \bar{X} \quad [4.1]$$

Donde, X_i : registro climático para el momento i . \bar{X} : promedio del período de referencia.

Una vez halladas las anomalías y con el fin de evaluar tendencias, se aplicó un análisis de regresión lineal sobre las anomalías anuales, ya que la variabilidad de las mensuales arroja tendencias con pendientes muy bajas o no significativas. Lo anterior permitió estimar la evolución de las fases negativas y positivas de las anomalías y por ende, establecer relaciones con otras variables y procesos que caracterizan la variabilidad climática.

Índices climáticos

La teleconexión climática está definida por la NCEI como las “*anomalías espaciales y temporales a gran escala que influyen en la variabilidad de la circulación atmosférica*” (NCEI, 2021c). De esta forma, entendiendo el sistema climático como un continuo espacial y temporal, los patrones de ocurrencia de ciertos eventos pueden repercutir en la manifestación de éstos en lugares remotos. Por ello, el término “teleconexión” hace alusión al vínculo remoto entre la variabilidad climática de una región con la ocurrencia de un fenómeno distante, también denominado “controlador remoto a gran escala” (Doblas-Reyes et al., 2021). Seneviratne et al. (2021) lo definen como la interconexión de diferentes regiones del mundo a través del clima y su variabilidad. De este modo, la ocurrencia de eventos extremos puede ser asociada con teleconexiones, cuyos análisis pueden conllevar al entendimiento de los mecanismos subyacentes de su ocurrencia (Boers, 2019).

Por su parte, Mentaschi et al. (2017) expresan que las teleconexiones pueden ser explicadas mediante la oscilación de patrones de variabilidad. De esta forma, a través de índices como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO; Newman et al., (2016) citado por Doblas-Reyes et al., 2021) pueden encontrarse correlaciones que no sólo pueden afectar regiones cercanas, sino zonas remotas del planeta a través de las teleconexiones atmosféricas.

Con el objetivo de obtener el rezago o *lag* de correlación cruzada entre índices climáticos y datos de precipitación en la región, fueron cros-correlacionadas mensualmente las series temporales de precipitación para la estación Guido (Figura 4.2), versus las series de tiempo de ocho índices climáticos.

A continuación, se presenta una descripción breve de cada índice utilizado:

1) Oscilación Antártica (AAO): también conocido como Modo Anular del Sur (SAM), representa el patrón de variabilidad climática natural predominante del hemisferio sur. Se caracteriza por una intensificación de los vientos del oeste

hacia los polos y debilitamiento sobre el ecuador. Posee una influencia significativa sobre las precipitaciones de regiones de latitudes altas (Gupta y McNeil, 2012). La construcción del índice es definida como la diferencia de presiones atmosféricas entre los 40° S y 65° S (Lee et al., 2019).

2) Oscilación Decadal del Pacífico (PDO): Zhang et al. (1997, citado por NCEI 2021d) lo definen como un patrón de variabilidad climática del océano Pacífico, cuyas fases (cálidas o frías) responden a anomalías térmicas de la superficie de la zona norte del Pacífico. Su periodicidad abarca lapsos de 10 a 30 años, con fases positivas o negativas asociadas a lluvias o sequías en diversas regiones del planeta (Met Office, 2021).

3) Índice de Oscilación del Sur (SOI): está representado por la diferencia media de presiones atmosféricas medidas entre Tahití y Darwin (extremos oeste y este tropicales del Pacífico, respectivamente). El monitoreo de este índice permite analizar el desarrollo del más conocido fenómeno de El Niño (conocido como ENSO, o El Niño – Oscilación del Sur por el vínculo mencionado) (Dahlman, 2009). En cuanto a sus fases, cuando el SOI toma valores negativos, coincide con episodios de El Niño (y viceversa con La Niña) (NCEI, 2021f).

4) Índice Oceánico de El Niño (ONI – *Oceanic Niño Index*): de acuerdo con el *Climate Prediction Center* (CPC, 2021) el término de este fenómeno hace alusión a un ciclo de gran escala e interacción entre el océano y la atmósfera, el cual implica cambios térmicos en la superficie del océano. El Niño representa la fase cálida o positiva del ciclo de ENSO (El Niño – Oscilación del Sur), siendo contrario (fase fría o negativa) para La Niña. Asimismo, también es influenciado por las diferencias de presión atmosférica a nivel del mar (Oscilación del Sur, u OS), entre la isla de Tahití y la costa de Darwin (Australia). La determinación del ciclo (generalmente entre tres a cuatro años de alternancia), comienza cuando el promedio de temperatura de tres meses supera la anomalía positiva o negativa de 0,5 °C en la región centro-oriental del Pacífico ecuatorial (entre los 5° N – 5° S y los 170° O – 120° O, denominada región Niño 3.4) (NWS, 2021).

5) El Niño Modoki (ENM): mientras que ONI se refiere a las anomalías térmicas del Pacífico en la región ecuatorial oriental, ENM involucra otras variables en la relación océano – atmósfera, como el calentamiento del Atlántico Sur y la interacción del sistema meteorológico del Polo Sur. La palabra Modoki proviene del japonés, que significa “parecido pero distinto” (Karumuri et al., 2007; Musi, 2015).

6) Índice de El Niño Multivariado (MEI): el Laboratorio de Ciencias Físicas de la NOAA (PSL, 2021) establece que este índice combina variables oceánicas y atmosféricas, facilitando análisis sobre el fenómeno ENSO. Asimismo, el índice proporciona indicadores acerca de la intensidad de ENSO, así como también una evaluación comparativa de sus condiciones. Las variables que involucra MEI incluyen: presión atmosférica al nivel del mar, componentes de vientos superficiales y temperaturas de la superficie del océano, cuyo análisis bajo técnicas multivariadas permiten el establecimiento de resultados más precisos (NCAR, 2021).

7) Oscilación de Madden-Julian (MJO): esta oscilación representa una perturbación tropical en ciclos de 30 a 60 días, que se propaga hacia el este de la región tropical. Sus impactos radican en la influencia sobre patrones de lluvias tropicales, extratropicales, circulación de la atmósfera y temperaturas entre las regiones tropicales y subtropicales. Existe evidencia acerca de las influencias de MJO sobre ciclos de intensidad y velocidad de desarrollo de eventos ENSO (Gottschalck y Higgins, s/f; BOM, 2021).

8) Dipolo del Océano Índico (IOD): el Bureau de Meteorología de Australia (BOM, 2021b) lo define como la diferencia de temperatura superficial marina entre las regiones (o polos) del mar Arábigo y el Índico cercano a Indonesia. Algunas influencias de este dipolo están comprobadas sobre el clima de Australia y la cuenca índica. Sin embargo, mediante teleconexión es posible observar correlaciones de algunos eventos remotos con este fenómeno. (p. ej., fases positivas de IOD están frecuentemente asociadas a fases positivas de ENSO) (Johnson, 2020).

Los registros de precipitación de la estación Guido se utilizaron pues registra el mayor número continuo de datos de las estaciones consideradas. La correlación cruzada es una metodología que mide el grado de similitud entre una serie temporal y otra con diferentes rezagos o *lags*. Su aplicación permite establecer relaciones no simultáneas entre la ocurrencia de una serie temporal y otra (en este caso, entre índices climáticos como variables independientes y la ocurrencia de precipitaciones en Guido como variable dependiente).

El análisis de correlación cruzada fue ejecutado mediante la función [ccf] en lenguaje de programación de R (versión 4.1.3) y en ambiente de RStudio. Los resultados generados son correlogramas (con rango entre -1 y 1) entre las variables contrastadas, incluyendo a su vez límites de confianza al 95 % a diferentes rezagos.

La magnitud de las correlaciones más altas halladas puede suponer relaciones de teleconexión entre las precipitaciones de la región de estudio con la ocurrencia de modos de variabilidad distantes. Esto podría ser significativo para el análisis prospectivo de las lluvias mediante el estudio de índices climáticos.

Análisis multitemporal del estado de la vegetación en el sitio Ramsar

Como un elemento indirecto acerca de la variabilidad hidroclimática, se utiliza el análisis espectral y multitemporal del estado de la vegetación. De esta forma, las relaciones entre la vigorosidad o presencia vegetal en la zona pueden proporcionar indicios acerca de los elementos climáticos que pueden incidir en la región. Como indicador de análisis espectral, se utilizó el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI). Este índice oscila entre -1 y 1 (desde ausencia a presencia vigorosa de vegetación, respectivamente) (Genesse y Melesse, 2018; Earth Observatory NASA, 2021). El NDVI se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad [4.2]$$

Donde, *NIR*: banda del infrarrojo cercano; *Red*: banda roja del espectro visible.

Los sensores utilizados fueron Landsat 5 (USGS: [LANDSAT /LT05/C01/T1_32DAY_NDVI] período 1985 – 1999) y Landsat 7 (USGS: [LANDSAT/LE07/C01/T1_32DAY_NDVI] período 2000 – 2019), que incluyen productos de colecciones de 32 días de NDVI. La extracción y filtrado de imágenes se realizó mediante la plataforma de código *JavaScript* de *Google Earth Engine* [GEE] (<https://code.earthengine.google.com/>).

Posterior al filtrado y adquisición de imágenes cortadas con el polígono del sitio Ramsar (Figura 4.2), se aplicó la prueba no paramétrica de tendencia de Mann-Kendall para los veranos e inviernos de los dos períodos considerados. Esta prueba con rango de -1 a 1, permite establecer la tendencia de la variable estudiada y con un carácter espacial bajo un determinado nivel de significancia. La función del algoritmo [ee.Reducer.kendallsCorrelation] crea un reductor que computa una jerarquía de correlación del τ_b de Kendall, con valores positivos para tendencias crecientes y viceversa para tendencias decrecientes (GEE, 2021).

La implementación de la correlación de Mann-Kendall se traduce mediante el cálculo del τ_b (Knight, 1966, citado por Org. Apache Commons, 2021) ([4.3]):

$$\tau_b = \frac{(n_c - n_d)}{\sqrt{(n_0 - n_1) * (n_0 - n_2)}} \quad [4.3]$$

Donde,

$n_0 = n * (n - 1) / 2$; n_c = número de pares concordantes; n_d = número de pares discordantes; $n_1 = \sum t_i * (t_i - 1) / 2$ para todo i ; $n_2 = \sum u_j * (u_j - 1) / 2$ para todo j ; t_i = número de valores vinculados en el i grupo de vínculos en x ; u_j = número de valores vinculados en el j grupo de vínculos en y .

Posterior al establecimiento de *rasters* de tendencia, éstos se agruparon en cuatro colecciones (veranos e inviernos entre 1985 – 1999 y entre 2000 – 2019). La diferencia temporal para la determinación de estos dos períodos responde a la construcción del principal embalse sobre el río Mendoza (Potrerillos, 2000).

De esta forma y mediante la visualización de los conjuntos de píxeles de tendencias positivas y negativas, se empleó el plugin “*Temporal / Spectral Profile*” (Guzinski, 2020) y “*Profile tool 4.1.8*” (Jurgiel et al., s/f) del software QGIS 3.10.12. Estas herramientas permiten evaluar la evolución temporal de NDVI para cada píxel solicitado (mediante 10 sitios y perfiles, respectivamente [Figura 4.3]), por lo que es posible visualizar series temporales (de acuerdo con la tendencia observada) y correlacionarla con elementos de variabilidad climática.

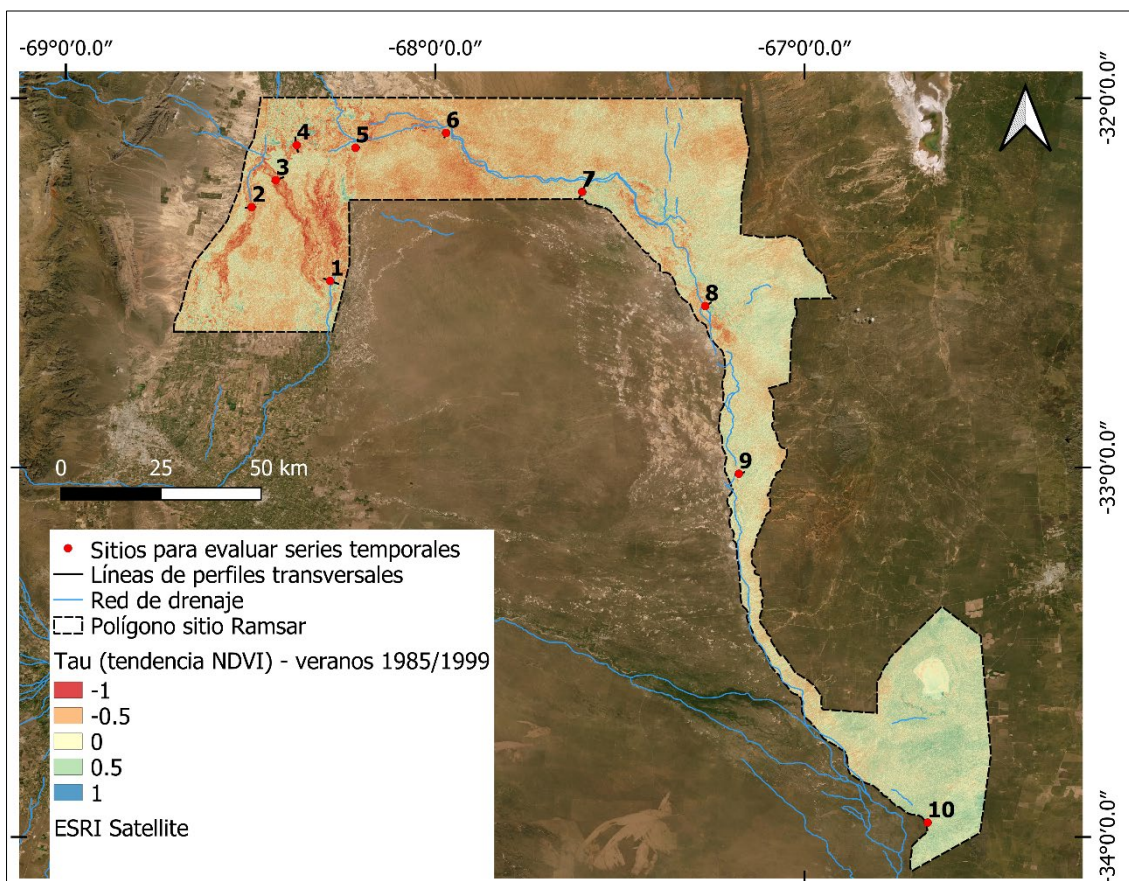


Figura 4. 3. Sitios y perfiles para la evaluación multitemporal y espacial del Tau (tendencia) de NDVI. La capa raster de Tau se utilizó como ejemplo de muestra temática.

Finalmente, los cuatro *rasters* multibanda generados (veranos 1985 – 1999 / inviernos 2000 – 2019), fueron contrastados con *rasters* mutibanda en los mismos períodos para las variables: precipitación y caudal medio mensual (en la estación Mendoza - Guido (1413) y caudales medios mensuales para la estación San Juan – El Encón (1219, períodos: inviernos 1993-1999, veranos 1991-1999, inviernos 2003-2018 y veranos 2001-2019).

El contraste se realizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r), cuyo rango $[-1,1]$ se aplica a pares de datos contrastados (p. ej., *rasters* multibanda), mediante el código de R propuesto por Abdi et al. (2016). El objetivo de este paso radica en la observación de patrones espaciales de correlación entre NDVI y precipitaciones y caudales. De esta forma, es posible relacionar temporal y espacialmente el estado de la actividad fotosintética, versus las precipitaciones medias de la zona (Guido) y los caudales de los ríos aportantes Mendoza y San Juan. Si bien se contó con disponibilidad de datos de descargas de caudales del dique Potrerillos ([DGI, s/f], río Mendoza, aguas abajo de Guido), su limitado número de datos mostró un coeficiente de correlación elevado respecto a las precipitaciones de Guido para los registros disponibles (Figura 4.4).

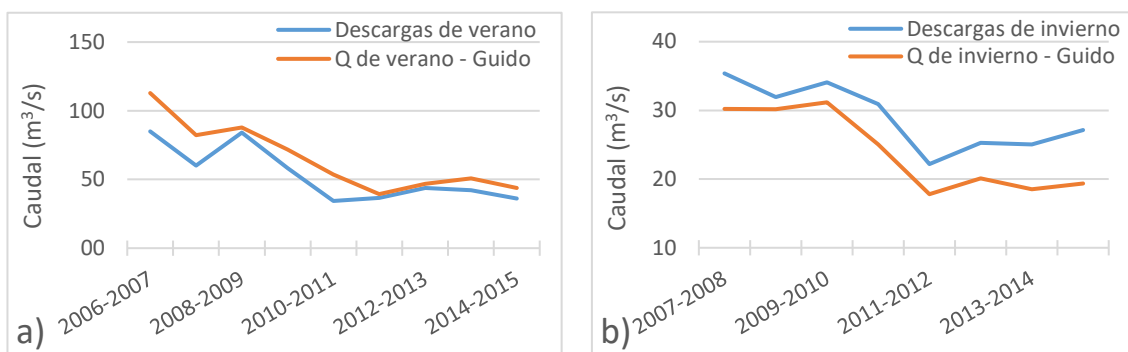


Figura 4. 4. Diferencias entre caudales de verano (a) e invierno (b) del río Mendoza, entre la estación Guido (1413) y las descargas de caudales del Dique Potrerillos.

Dada la elevada correlación entre las descargas en Potrerillos y caudales de Guido, se optó por utilizar los caudales medidos en Guido para el análisis de contraste con NDVI. Cabe destacar que no existen estaciones hidrométricas o de aforo aguas abajo del oasis para realizar el análisis (situación ideal para evaluar el impacto de consumo de agua en el oasis de Mendoza (Figura 4.1).

Por otro lado, si bien no hubo disponibilidad de datos de descargas de las represas sobre el río San Juan, existen datos de caudales en la estación San Juan - El Encón (estación 1219, Figura 4.1). Dado que esta estación se encuentra dentro del sitio Ramsar las diferencias entre su hidrograma y los de estaciones aguas arriba del oasis de San Juan (estación San Juan km 101 – 1211) resultan notables y establecen los posibles impactos del uso del agua en la zona (Figura 4.5).

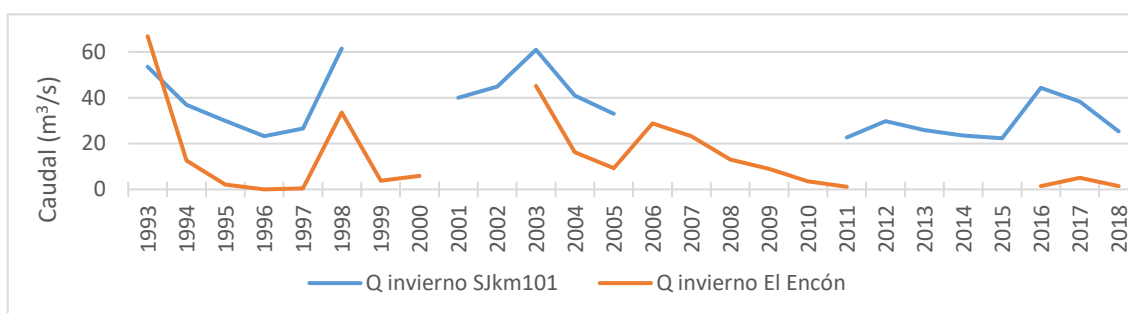


Figura 4. 5. Diferencias entre caudales medios mensuales de invierno del río San Juan entre la estación San Juan km 101 (SJkm101 – serial 1211) y El Encón (1219).

La diferencia entre ambas estaciones (separadas por el oasis irrigado de San Juan, Figura 4.1) sugieren un aprovechamiento hídrico que resta escorrentía al sitio Ramsar (Figura 4.5). De esta forma, la rasterización de esta serie temporal se consideró idónea para el análisis de correlación entre NDVI y los caudales medios mensuales del río Mendoza en Guido y del San Juan en El Encón.

Finalmente, y como elemento de visualización contrastante y con base en un MDE (modelo digital de elevación [NASA SRTM Digital Elevation 30m – Farr et al., 2007]) del sitio Ramsar, se calculó el índice topográfico de humedad (TWI, *topographic wetness index*). Este índice (combinación entre área de contribución de agua y la pendiente) es frecuentemente utilizado como aproximador de la

humedad del suelo, así como en ciencias ambientales y gestión de recursos hídricos (Kopecky et al., 2021).

RESULTADOS

El área de estudio (Figura 4.1) se ubica entre los meridianos 76° y 66° O y los paralelos 30° y 35° S, hacia el centro-occidente de la República Argentina, teniendo como principal frontera natural a la cordillera de Los Andes (al oeste). Los resultados exponen un panorama general acerca de la variabilidad hidroclimática de la región, específicamente entre los caudales, temperatura y precipitación.

Análisis espectral

Los periodogramas (log-log) y ondoletas de temperatura, precipitación y caudal medido de la estación Guido (serial 1413 – Figura 4.1) se presentan en las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8. Los resultados se compilan además en las tablas resumen 4.2, 4.3 y 4.4. Estas tablas se vinculan con modos de variabilidad climática como la mostrada en la Figura 4.9 para los índices ONI y PDO.

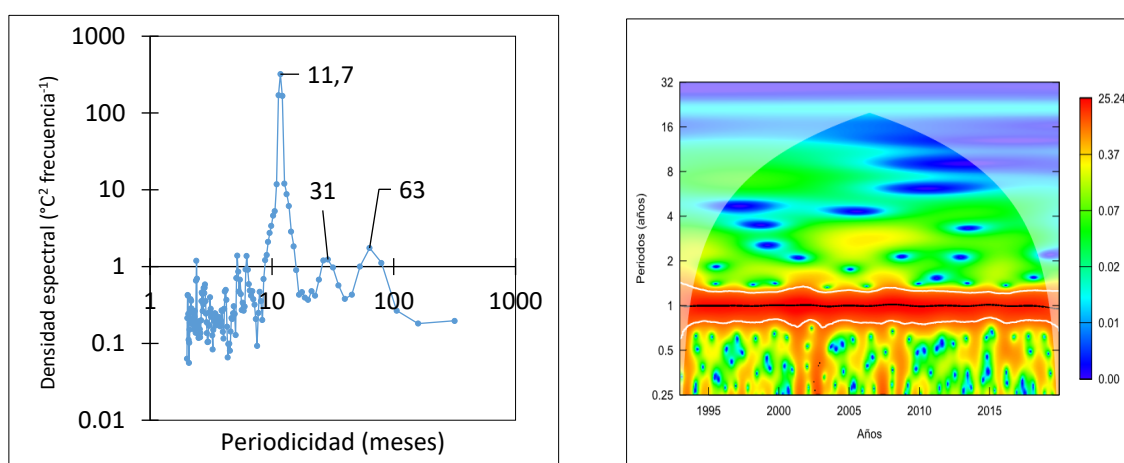


Figura 4. 6. Análisis espectral de temperatura media mensual para la estación Guido (1413). Periodograma (izquierda) y ondoleta (derecha). La barra a la derecha del gráfico de ondoletas representa la potencia normalizada de ondoleta, con colores cálidos indicando un mayor cambio de frecuencia. Las líneas blancas encierran zonas con un 95 % de confianza. La región del cono de influencia (transparencia blanca), indica la zona del espectro de ondículas en la que los efectos de borde se vuelven importantes. La diferencia de escalas temporales responde a mejorar la interpretación de los gráficos, con mayor énfasis analítico en el periodograma y con mayor contraste visual con las ondoletas (válido también para las Figuras 4.7 y 4.8).

Las temperaturas medias (Figura 4.6) presentaron una periodicidad de mayor energía en la frecuencia anual. Este máximo de periodicidad se distingue en el periodograma (izquierda) y en la ondoleta (derecha). Lo anterior se explica ya que la variabilidad térmica está fundamentalmente definida por el movimiento de traslación del planeta alrededor del Sol. Si bien en el periodograma se observan

dos máximos adicionales (31 y 63 meses, o 2,6 y 5,3 años, respectivamente) estos no son visibles en períodos continuos para una potencia de ondoleta significativa.

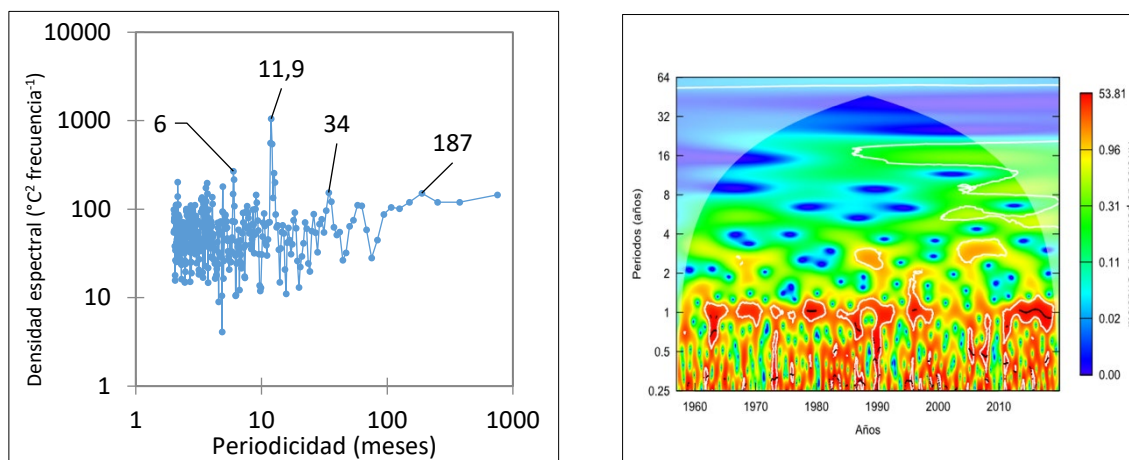


Figura 4. 7. Análisis espectral de precipitación media mensual para la estación Guido (1413). Periodograma (izquierda) y ondoleta (derecha). La barra a la derecha del gráfico de ondoletas representa la potencia normalizada de ondoleta, con colores cálidos indicando un mayor cambio de frecuencia. Las líneas blancas encierran zonas con un 95 % de confianza. La región del cono de influencia (transparencia blanca), indica la zona del espectro de ondículas en la que los efectos de borde se vuelven importantes.

Las precipitaciones (Figura 4.7) tienen una mayor densidad espectral en la periodicidad anual y cuasi-continua en el período estudiado. Adicional a este máximo, existen otros períodos de elevada densidad espectral, de 0,5; 2,8 y 15,6 años, respectivamente, indicando una variabilidad trimestral, interanual y decadal importante. En el gráfico de ondoletas y para una periodicidad entre 3 y 4 años, la mayor energía se asocia a eventos El Niño moderados a fuertes, principalmente para los períodos alrededor de 1970, 1990 y 2008 (Figura 4.10).

Si bien las periodicidades indican la respuesta de la precipitación a las ventanas temporales de los modos de variabilidad considerados, en el caso de ENSO no expresa su vinculación a fases positivas o negativas. En este sentido y de acuerdo con el gráfico de ondoletas y la Figura 4.10, el período previo a 1990 se corresponde con una fase de ENSO fría (La Niña). De esta forma, las distintas fases de ENSO pueden incidir en la variabilidad de las precipitaciones en la región, con períodos más secos o húmedos asociados a eventos ENSO negativos y positivos, respectivamente (Poblete y Vera, 2017; Poblete y Castro, 2021).

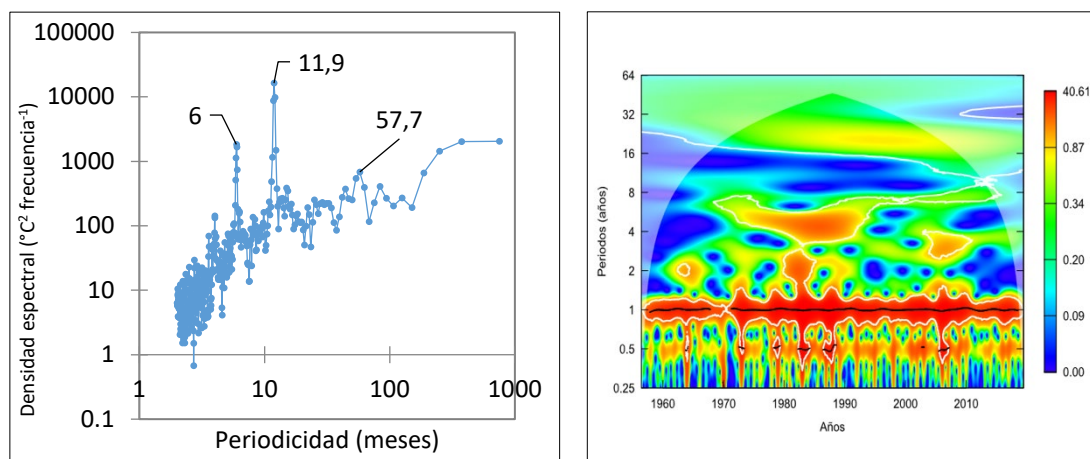


Figura 4. 8. Análisis espectral del caudal medio mensual para la estación Guido (1413). Periodograma (izquierda) y ondoleta (derecha). La barra a la derecha del gráfico de ondoletas representa la potencia normalizada de ondoleta, con colores cálidos indicando un mayor cambio de frecuencia. Las líneas blancas encierran zonas con un 95 % de confianza. La región del cono de influencia (transparencia blanca), indica la zona del espectro de ondulitas en la que los efectos de borde se vuelven importantes.

Los caudales medios (Figura 4.8) presentan naturalmente, la mayor densidad espectral representada por el ciclo hidrológico anual. Adicionalmente, también sobresalen densidades espectrales elevadas para 6 meses y 57,7 meses (4,8 años). Este último afín a la ventana temporal del ciclo de ENSO (analizado a través del índice ONI) (Figura 4.9). Respecto al gráfico de ondoletas, se muestra un período entre mediados de los años 70 y 90 asociado a fases negativas (con periodicidad de 4 años), ocurrido entre 1983 y 1992) (Figura 4.10).

Para este período mencionado, en la Figura 4.10 se observa un período de ENSO negativo entre estos años, sólo interrumpido por un año de ENSO positivo alrededor de 1987. Al igual que con la precipitación, las fases de ENSO negativo representan una disminución en las nevadas de la cordillera andina, por lo que puede traducirse en una disminución de la producción de escorrentía de la zona (Poblete y Castro, 2021).

A escala regional, el efecto de estos modos de variabilidad climática incide sobre la variabilidad de los caudales, representando así una parte importante a considerar para el abastecimiento hídrico de los ecosistemas de humedales aguas abajo.

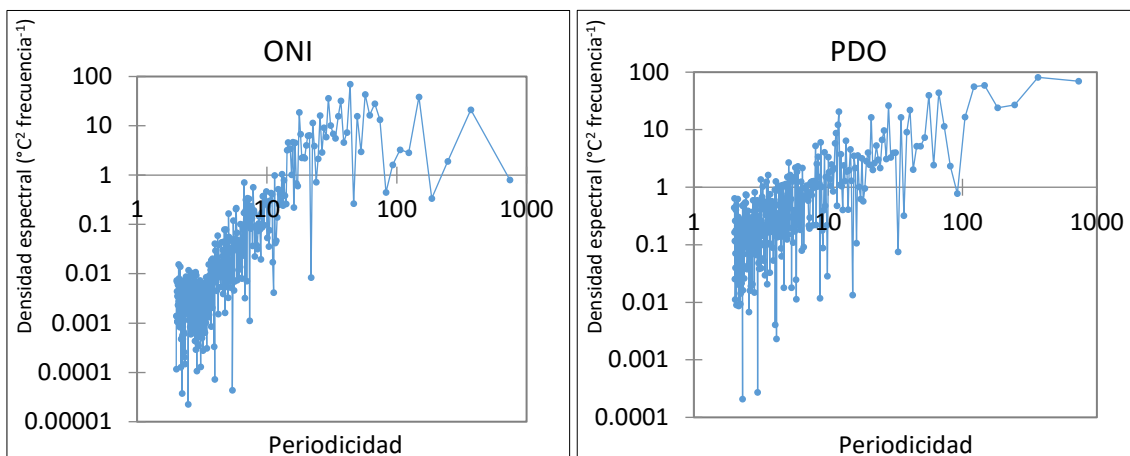


Figura 4. 9. Periodogramas para los modos de variabilidad de ONI (1957 – 2019) y PDO (1957 – 2017). Los máximos de energía representan las periodicidades tipo para estos modos de variabilidad (ver descripción en sección de metodología). Fuente de datos: NCEI (2021d; 2021e).

El rango temporal de los periodogramas de la Figura 4.9 (p. ej., ONI y PDO), pueden vincularse numéricamente con las periodicidades resultantes para las variables temperatura, precipitaciones y caudal medio mensual (Tablas 4.2, 4.3 y 4.4, respectivamente).

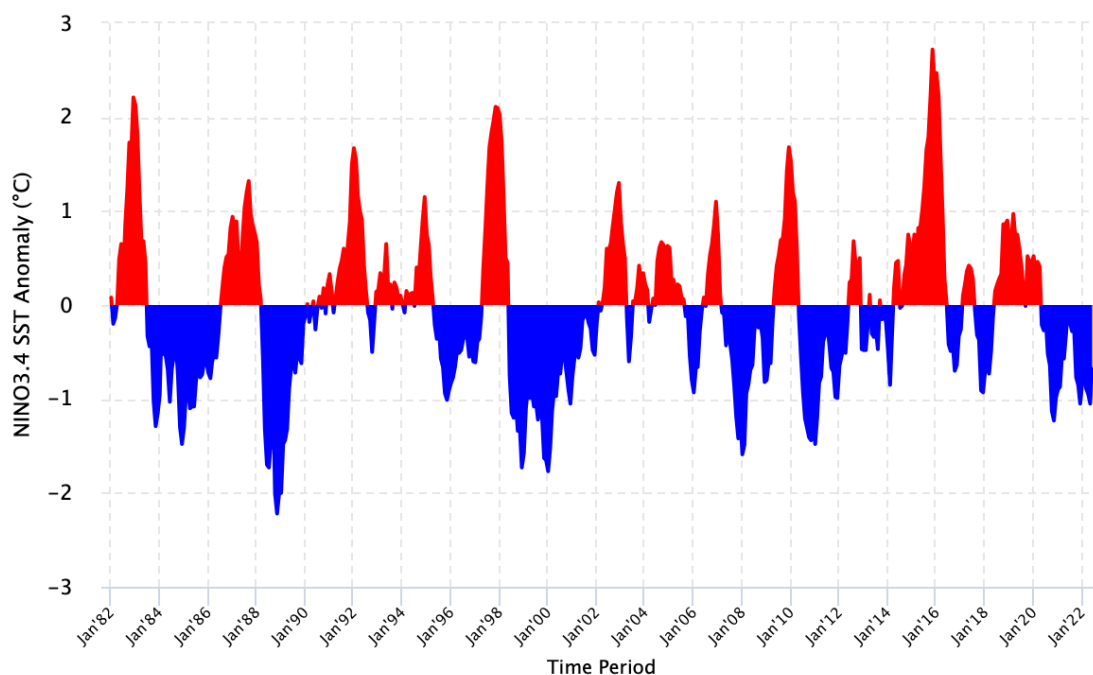


Figura 4. 10. Variabilidad de anomalía de temperatura de superficie del Pacífico (región Niño 3.4) entre 1982 y 2022. Tomado de: Climate Prediction Center (CPC, 2022).

Tabla 4. 2. Resumen de periodicidades máximas (años) asociados a los periodogramas de temperatura media mensual (Figura 4.6) de acuerdo con períodos de mayor energía y su vinculación con ventanas temporales de variabilidad climática. Los colores indican la periodicidad (indicada en la leyenda de la parte inferior de la tabla).

Tupungato -					
	Mendoza - Guido	Pta. de Vacas	San Juan - km 47,3	San Juan - km 101	Tunuyán - Valle de Uco
	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2
	0,4	0,7	0,5	0,5	0,4
	0,5	1,0	0,7	0,7	0,5
	1,0	1,6	1,0	1,0	0,7
	2,4	2,7	3,8	3,1	0,9
	5,3	5,3			1,0
					2,3
					4,3
					8,6

Variabilidad	Trimestral	Semestral	Anual	Bianual	Interanual
Años	0,3	0,5	1	2	4-7
Meses	3,6	6	12	24	48-84

Tabla 4. 3. Resumen de periodicidades máximas (años) asociados a los periodogramas de precipitación media mensual (Figura 4.7) de acuerdo con períodos de mayor energía y su vinculación con ventanas temporales de variabilidad climática. Los colores indican la periodicidad (indicada en la leyenda de la parte inferior de la tabla).

	Tupungato - Pta. De Vacas	Tunuyán - Valle de Uco	Mendoza - Guido	Mendoza - INA CRA	San Juan - km 47,3	San Juan - km 101
	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4
	0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5
	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0
	1,0	0,8	0,8	0,7	0,8	1,6
	1,5	1,0	1,0	0,8	1,0	4,7
	3,8	2,8	1,5	2,0	1,3	
		5,8	2,9	4,3	4,2	
		7,8	5,2	6,5	5,7	
		31,6	15,7		23,0	

Variabilidad	Trimestral	Semestral	Anual	Bianual	ENSO	Décadas (PDO)
Años	0,3	0,5	1	1,5	4-7	< 10
Meses	3,6	6	12	18	48-84	< 120

Tabla 4. 4. Resumen de periodicidades máximas (años) asociados a los periodogramas de caudal medio mensual (Figura 4.8) de acuerdo con períodos de mayor energía y su vinculación con ventanas temporales de variabilidad climática. Los colores indican la periodicidad (indicada en la leyenda de la parte inferior de la tabla).

Tunuyán - Valle de Uco	San Juan km 101	Mendoza - Guido	San Juan - El Encón	Desag. - Arco del Desag.
0,3	0,2	0,2	0,5	0,2
0,5	0,3	0,3	0,8	0,3
1,0	0,4	0,5	1,1	0,4
2,1	0,5	1,0	1,5	0,5
3,8	1,0	1,3	2,5	0,6
5,0	2,0	2,4	5,0	0,8
7,2	4,8	3,9	12,5	1,1
10,8		4,8		
21,7		6,9		

Variabilidad	Trimestral	Semestral	Anual	Bianual	ENSO	Décadas (PDO)
Años	0,3	0,5	1	1,5	4-7	< 10
Meses	3,6	6,0	12	18	48-84	< 120

Relacionado a las tablas resumen anteriores, dependiendo del n utilizado y disponible para cada estación, se muestra que las periodicidades de las mayores densidades espectrales presentan similitudes numéricas, vinculadas a su vez con ventanas temporales de variabilidad. De esta forma y de acuerdo con las máximas densidades espectrales consideradas, en orden de importancia destacan los ciclos de variabilidad anuales, seguidos por ENSO y PDO.

Anomalías

Las anomalías de temperatura, precipitación y caudal medio anual de la estación Guido (Tabla 4.1) se presentan en las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13. Dada la heterogeneidad de longitud de datos disponibles (Tabla 4.1) para este análisis, se eligió que el inicio del período común sea el año 1993. Algunas variables de las estaciones San Juan km 101, San Juan km 47,3 y Desaguadero – Arco del Desaguadero no fueron consideradas por presentar una longitud de la serie temporal menor a 10 años.

Los resultados del resto de las estaciones estudiadas se exponen en gráficos resumen de pendientes de regresión lineal de anomalías anuales (Figura 4.14) para cada variable

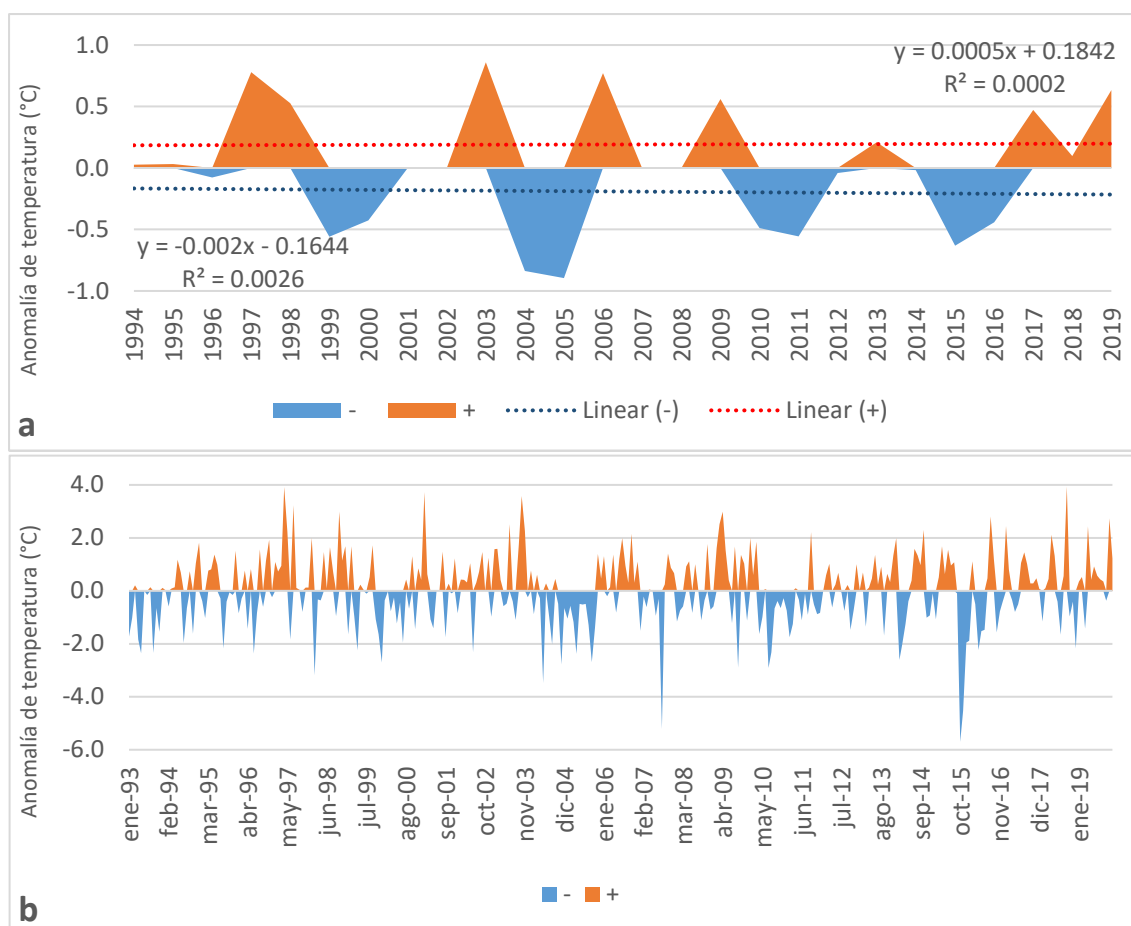


Figura 4. 11. Anomalías de temperatura media anual (a) 1994 – 2019 y mensual (b) 1993 - 2019 de la estación Guido. Las variables X e Y de las ecuaciones de tendencia lineal (a), indican la magnitud de la pendiente de la recta y el intersepto, respectivamente.

Si bien las pendientes de temperatura media anual son positivas para esta estación, presentan una ligera tendencia creciente durante el período considerado. Dado que el valor de la pendiente es baja y no significativa en magnitud, concuerda con las estimaciones derivadas del VI informe del IPCC (2021), donde se pronostica un aumento de temperaturas globales de acuerdo con diversos escenarios. Los ciclos de anomalías de temperaturas positivas y negativas inciden sobre el aporte de agua de origen glaciar o nival sobre las escorrentías andinas.

Las pendientes crecientes de anomalías positivas de temperatura pueden tener relación con los impactos derivados del cambio climático (IPCC, 2021), los cuales pueden incidir a largo plazo en la aceleración de la fusión glaciar y nival en la cordillera.

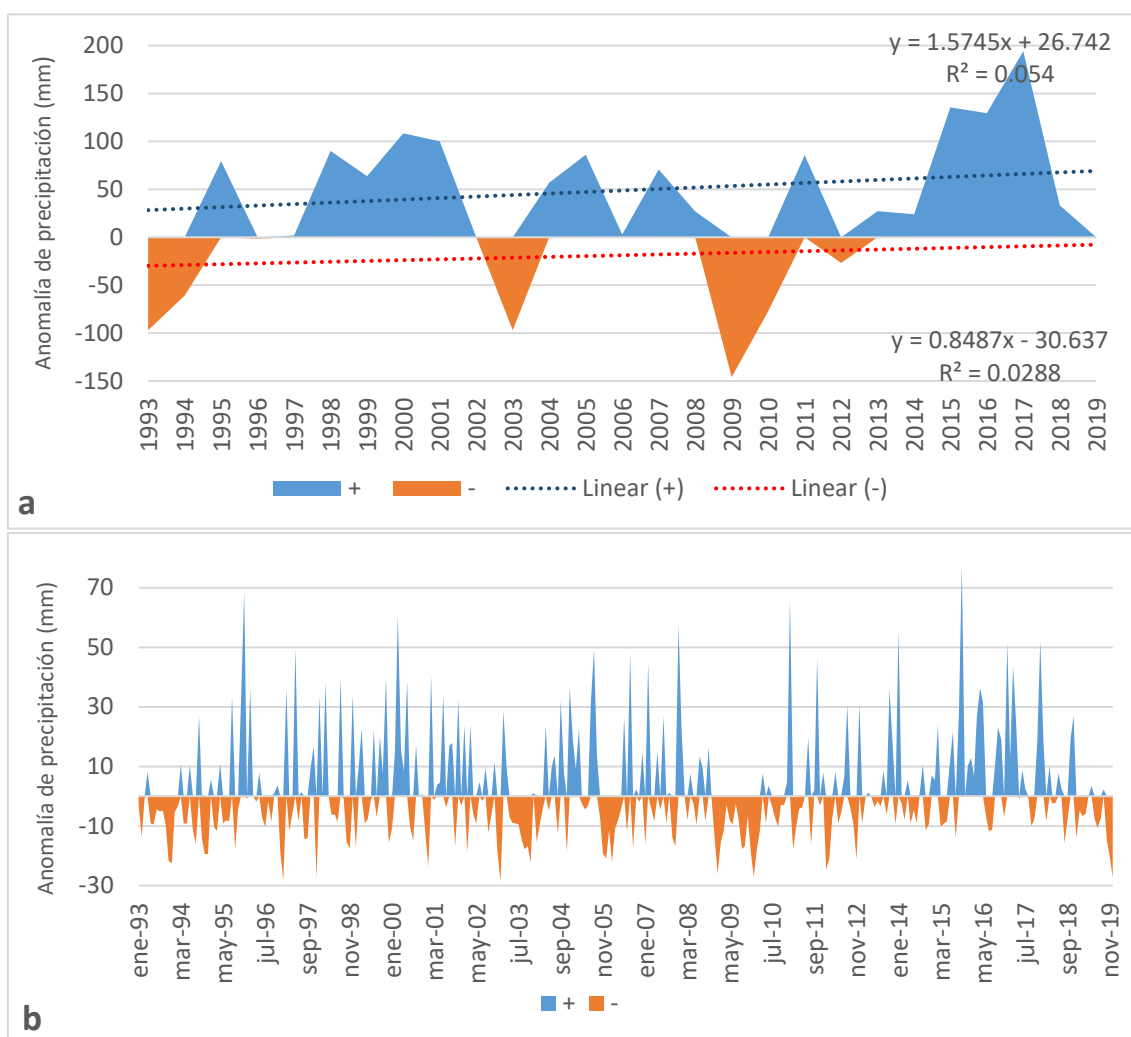


Figura 4. 12. Anomalías de precipitación media anual (a) 1994 – 2019 y mensual (b) 1993 - 2019 de la estación Guido. Las variables X e Y de las ecuaciones de tendencia lineal (a), indican la magnitud de la pendiente de la recta y el intersepto, respectivamente.

Las anomalías de precipitación anual, en contraste con las de la temperatura media, presentan los valores de las pendientes más elevadas, tanto para anomalías positivas como negativas. Por otra parte, la magnitud de las anomalías de precipitación positivas sobrepasa a las negativas, siendo casi un 25 % superior en las anuales y alrededor de un 100 % para las mensuales. Esto puede relacionarse al aumento de magnitud de eventos de precipitaciones, cuyas características responden a ambientes áridos (eventos de lluvias de gran intensidad y corta duración).

Asimismo y dada la tendencia observada en la Figura 4.12a, es posible que en el futuro la mayor parte de las precipitaciones anuales se concentren en eventos de corta duración. Lo anterior es respaldado por los hallazgos derivados del análisis del PCI (índice de concentración de precipitaciones) analizados en el capítulo III, así como por los pronósticos para la región de estudio por parte del VI informe del IPCC (2021).

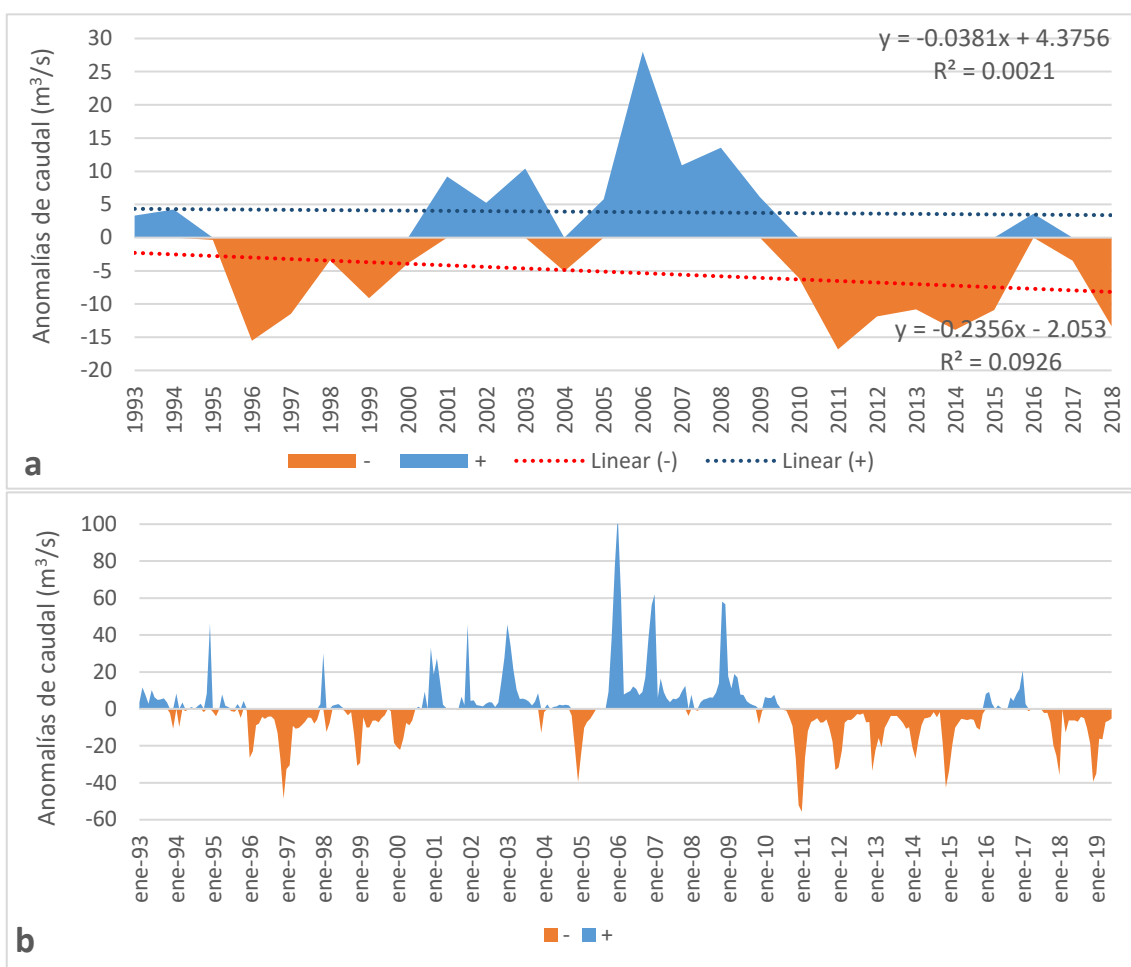


Figura 4. 13. Anomalías del caudal medio anual (a) 1994 – 2019 y mensual (b) 1993 - 2019 de la estación Guido (1413). Las variables X e Y de las ecuaciones de tendencia lineal (a), indican la magnitud de la pendiente de la recta y el intersepto, respectivamente.

Las anomalías de los caudales presentan ligeras pendientes negativas. Sin embargo, la magnitud de la pendiente es mayor para las anomalías negativas. Es notorio resaltar la periodicidad de la ocurrencia de anomalías, la cual presenta lapsos de entre tres y cinco años, en concordancia con lo observado con la variación interanual de los espectros observados en la TRF. En la siguiente subsección de índices se analizan las vinculaciones entre estos períodos homogéneos de anomalías e indicadores de modos de variabilidad climática que afectan la región (p. ej., ENSO).

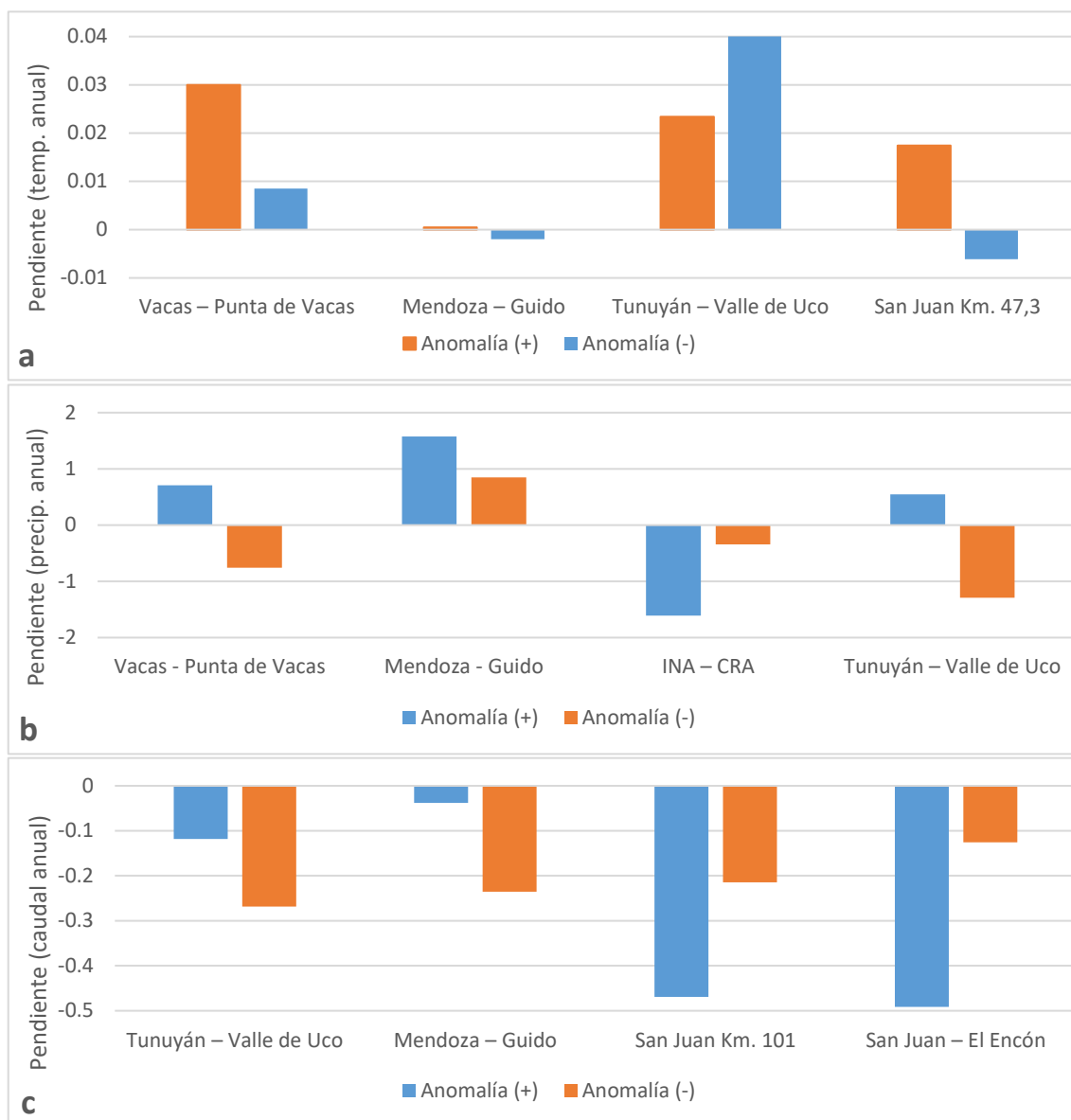


Figura 4. 14. Pendientes de regresión lineal para anomalías medias anuales de temperatura (a), precipitación (b) y caudales (c).

Dada la variabilidad de análisis con anomalías mensuales, para un resultado más significativo del análisis se usaron las anomalías anuales (las mensuales poseen menores pendientes dada la alta variabilidad de las series). Las anomalías positivas y negativas de temperatura (Figura 4.14a) presentan tendencia creciente, salvo en la estación Mendoza – Guido, donde los resultados son poco significativos. Esto tiene relación con lo estimado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2021), el cual expone en su informe VI que es muy probable que las temperaturas medias aumenten en las subregiones latinoamericanas, incluso por encima de la media global (nivel de confianza alto).

Por otra parte, la magnitud de las pendientes es similar para las anomalías positivas y negativas (Figura 4.14b). Sin embargo, las positivas presentan tendencia al alza para las estaciones situadas sobre la región andina al oeste (Punta de Vacas, Guido y Valle de Uco).

Finalmente, en la Figura 4.14c y respecto a los caudales, las cuatro estaciones presentan pendientes negativas para las dos clases de anomalías, siendo de mayor magnitud (-) las negativas en la región montañosa de Valle de Uco y Guido y las positivas hacia San Juan km 101 y El Encón. Cabe destacar que la estación de El Encón (1219 – Figura 4.1) se encuentra dentro del sitio Ramsar y aguas abajo de la región de oasis irrigados. Esto último puede tener vinculaciones con efectos de origen antrópico (usos agrícolas aguas arriba).

La situación con la magnitud de las tendencias positivas para El Encón puede explicarse como una disminución progresiva, manifestándose en ausencia de anomalías positivas a partir de noviembre del 2008 (Figura 4.15). Este momento temporal coincide con la declaración oficial de “emergencia hídrica” en la provincia de Mendoza desde septiembre de 2010 (Prensa Gobierno de Mendoza, 2010), citando:

“El Departamento General de Irrigación ha informado sobre la situación de alerta hídrica en los ríos que bañan la provincia, especialmente en el Río Mendoza, como consecuencia de la ausencia de precipitaciones níveas durante el período invernal 2010”.

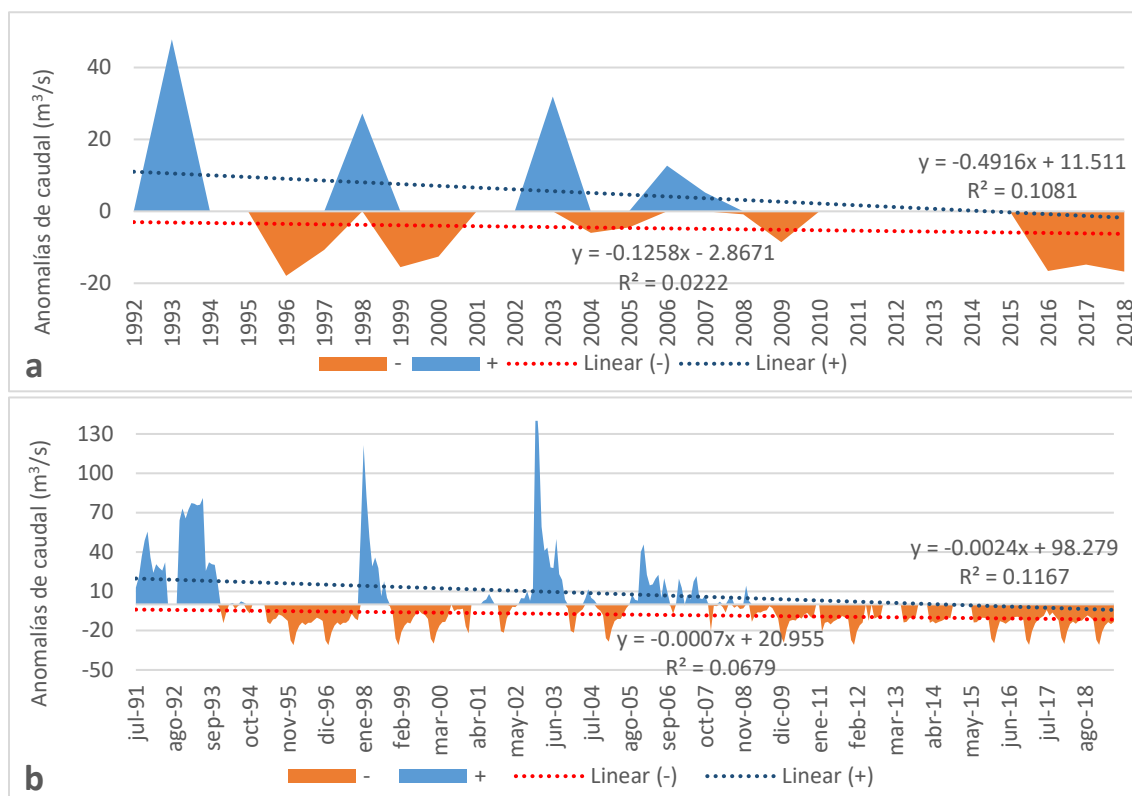


Figura 4. 15. Anomalías de caudal medio anual (a) 1992 – 2018 y mensual (b) 1991 - 2018 de la estación El Encón (1219).

Meses después (junio de 2011), el Senado y la Cámara de Diputados de la Provincia de Mendoza sancionan la Ley 8.318 (SAIJ, 2011), la cual:

“Declara la Emergencia Hídrica en todo el Territorio Provincial y establece distintas medidas, a fin de afrontar las consecuencias perjudiciales que pudieran derivarse de la escasez de agua superficial para el ciclo hidrológico 2.010/2.011”.

De esta forma, en los oasis mendocinos aguas arriba se comenzó una etapa de emergencia que persistió de forma ininterrumpida aún hasta el fin de la serie de datos considerada (2019). Para ese momento, el Departamento General de Irrigación (DGI, 2019), en su pronóstico de caudales de 2019/2020 estimó que:

“Se espera que en la temporada 2019/2020 haya alrededor de un 11% menos de agua de la 2018/2019”.

Por su parte y en el mismo contexto, el Superintendente de Irrigación (Prensa Gobierno de Mendoza, 2019) expresó:

“...Hace 10 u 11 años que se repiten los panoramas año tras año. Dependiendo del río, hay menor cantidad de agua disponible”.

Lo anterior indica que, dada la emergencia hídrica prolongada, se establecieron medidas para mitigar sus efectos en la matriz productiva agrícola de la región. Bajo estas circunstancias y con condiciones naturales áridas, la priorización del recurso hídrico se concentra en su regulación, lo cual disminuye las escorrentías aguas abajo y propicia la situación mostrada en la Figura [4.15](#).

Índices climáticos

Dada la naturaleza de las variables utilizadas, se efectuó un análisis de comparación entre índices climáticos y la precipitación media de la región. La precipitación es una de las principales entradas de agua al ciclo hidrológico, siendo también, en esta investigación, la variable con mayor longitud de datos disponibles en la región. No se seleccionaron los caudales, pues en la zona de estudio se presentan alteraciones de origen humano y por lo tanto, los resultados de los índices presentarían sesgos no naturales sobre los resultados. Las ventanas temporales de datos realizadas en el contraste de cada índice versus precipitación (Guido – 1413) se presentan en la Tabla [4.5](#), mientras que los correlogramas cruzados se muestran en las Figuras [4.16](#) a [4.23](#).

Tabla 4. 5. Ventanas temporales de los índices climáticos utilizadas en este estudio.

Índice climático	Ventana temporal utilizada
Oscilación Antártica (AAO)	01/1979 – 11/2019
Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)	01/1957 – 12/2017
Índice de Oscilación del Sur (SOI)	01/1957 – 12/2017
El Niño Modoki (ENM)	01/1987 – 02/2020
Índice Oceánico de El Niño (ONI)	01/1957 – 03/2019
Índice de El Niño Multivariado (MEI)	01/1979 – 03/2019
Oscilación de Madden-Julian (MJO)	06/1974 – 11/2019
Dipolo del Océano Índico (IOD)	01/1957 – 12/2019

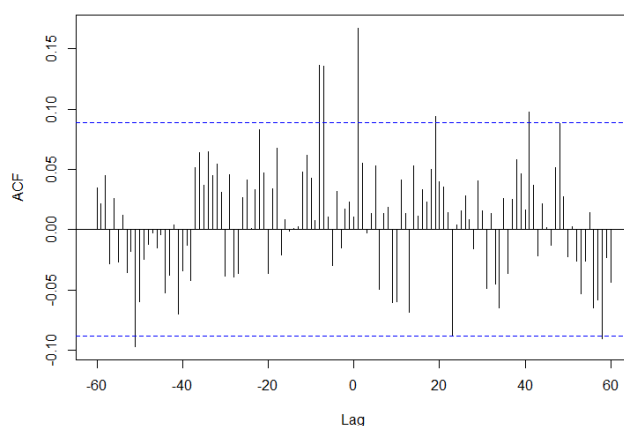


Figura 4. 16. Correlación cruzada entre el índice AAO y precipitación en Guido. Los ejes Y y X expresan la función de autocorrelación (Autocorrelation Function – ACF) y los rezagos o lag considerados, respectivamente. Las líneas punteadas en color azul señalan los límites de confianza al 95 %.

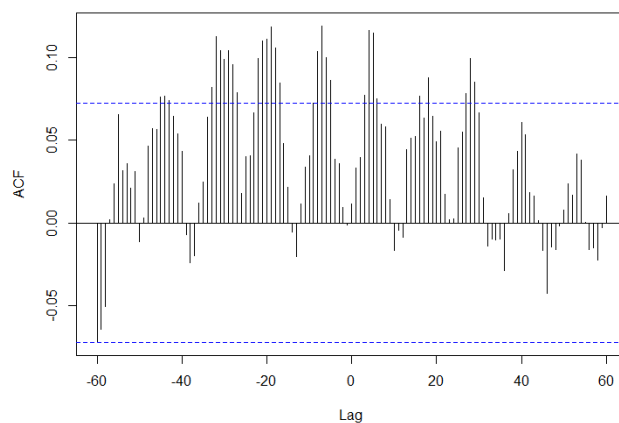


Figura 4. 17. Correlación cruzada entre el índice PDO y precipitación en Guido. Los ejes Y y X expresan la función de autocorrelación (Autocorrelation Function – ACF) y los rezagos o lag considerados, respectivamente. Las líneas punteadas en color azul señalan los límites de confianza al 95 %.

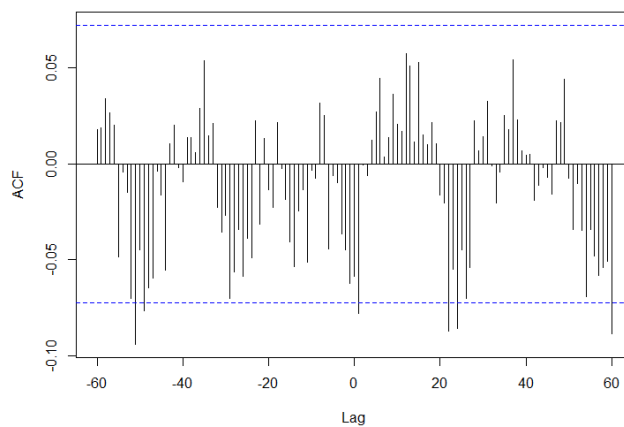


Figura 4. 18. Correlación cruzada entre el índice SOI y precipitación en Guido. Los ejes Y y X expresan la función de autocorrelación (Autocorrelation Function – ACF) y los rezagos o lag considerados, respectivamente. Las líneas punteadas en color azul señalan los límites de confianza al 95 %.

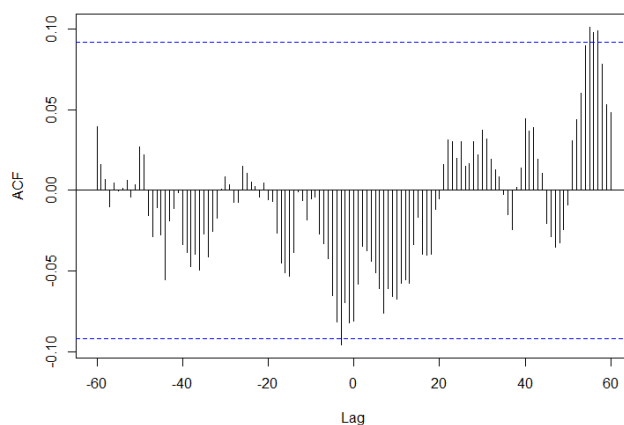


Figura 4. 19. Correlación cruzada entre el índice ENM y precipitación en Guido. Los ejes Y y X expresan la función de autocorrelación (Autocorrelation Function – ACF) y los rezagos o lag considerados, respectivamente. Las líneas punteadas en color azul señalan los límites de confianza al 95 %.

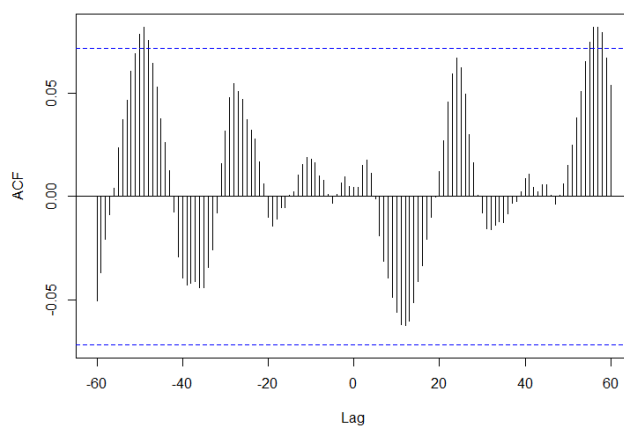


Figura 4. 20. Correlación cruzada entre el índice ONI y precipitación en Guido. Los ejes Y y X expresan la función de autocorrelación (Autocorrelation Function – ACF) y los rezagos o lag considerados, respectivamente. Las líneas punteadas en color azul señalan los límites de confianza al 95 %.

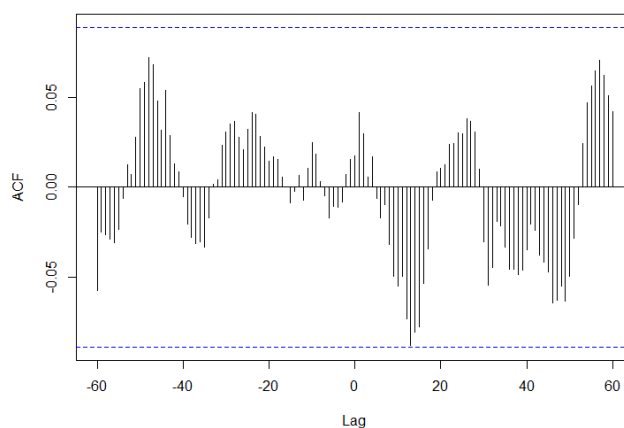


Figura 4. 21. Correlación cruzada entre el índice MEI y precipitación en Guido. Los ejes Y y X expresan la función de autocorrelación (Autocorrelation Function – ACF) y los rezagos o lag considerados, respectivamente. Las líneas punteadas en color azul señalan los límites de confianza al 95 %.

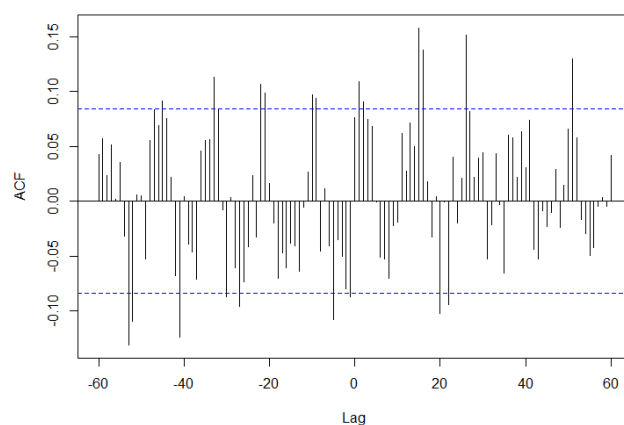


Figura 4. 22. Correlación cruzada entre el índice MJO y precipitación en Guido. Los ejes Y y X expresan la función de autocorrelación (Autocorrelation Function – ACF) y los rezagos o lag considerados, respectivamente. Las líneas punteadas en color azul señalan los límites de confianza al 95 %.

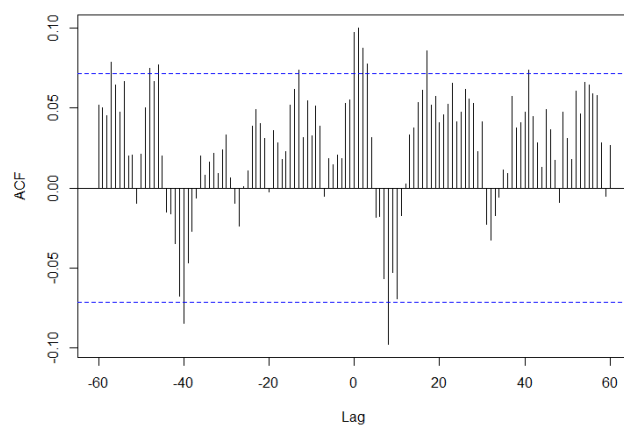


Figura 4. 23. Correlación cruzada entre el índice IOD y precipitación en Guido. Los ejes Y y X expresan la función de autocorrelación (Autocorrelation Function – ACF) y los rezagos o lag considerados, respectivamente. Las líneas punteadas en color azul señalan los límites de confianza al 95 %.

El correlograma entre AAO y la precipitación presenta su mayor valor significativo para un *lag* positivo de 1, con 0,167 (Figura 4.16). Por su parte, *lags* negativos de 7 y 8 muestran correlaciones significativas (aunque de menor magnitud) de 0,137 y 0,135, respectivamente. Esto indica que, para rezagos de 1 mes, este modo de variabilidad incide significativamente sobre el aumento de las precipitaciones.

Respecto a PDO (Figura 4.17), los rezagos significativos se agrupan en conjuntos que oscilan desde los dos a los siete meses continuos y a intervalos de entre 11 a 14 meses. De esta forma, existen cuatro grupos con rezagos significativos negativos, cuyo mayor valor (0,119) se alcanza para un *lag* de 7. En cuanto a los rezagos significativos positivos, la mayor correlación obtiene un 0,117 (*lag* 4). La periodicidad respecto a correlaciones positivas para rezagos negativos, indica una influencia recurrente de este modo de variabilidad sobre las precipitaciones.

Para la relación entre el índice SOI y las precipitaciones (Figura 4.18), no se observan correlaciones significativas positivas, mientras que, en las negativas significativas, registra seis *lags* que alcanzan los -0,094 para un rezago de -51. Además de un rezago negativo cercano al umbral de significancia (*lag* -49), los restantes cuatro rezagos significativos siguen manteniendo correlaciones negativas, para *lags* de 1, 22, 24 y 60 meses. Este modo de variabilidad se caracteriza por presentar valores negativos durante fases de El Niño (positivas). Su influencia sobre la precipitación es débilmente significativa para los rezagos mencionados.

Respecto a ENM (Figura 4.19), las correlaciones significativas sobrepasan ligeramente los umbrales de significancia. El primero sucede para un *lag* de -3 meses (correlación negativa), mientras que el resto se agrupa alrededor de un conjunto de tres correlaciones positivas que alcanzan los 0,101 para un rezago de 55. La débil correlación significativa para estos rezagos en oscilaciones menos cíclicas hace inferir que este índice no presenta una influencia importante sobre las precipitaciones en la zona.

La vinculación entre ONI y las precipitaciones (Figura 4.20) se observa mediante la alternancia de ciclos con correlaciones positivas y negativas que sólo sobrepasan el umbral de significancia para sus pares positivos, con rezagos de -50 y 56 (0,078 y 0,082, respectivamente). En años, estos rezagos representan una ventana entre 4,1 y 4,6 años, los cuales coinciden con los ciclos generales de ENSO, por lo tanto, se destaca su influencia como modo de variabilidad sobre la ocurrencia de las precipitaciones de la región.

La relación entre MEI y las precipitaciones (Figura 4.21) no se hace significativa para ningún rezago considerado. Sin embargo, para un *lag* de 13, la correlación alcanza el umbral de significancia, con una relación inversa de -0,088. Aún bajo ausencia de significancia, los ciclos de correlación se vinculan con ONI, aunque con menor intensidad y definición cíclica.

Con relación a MJO (Figura 4.22), el índice presenta una oscilación de rezagos máximos y mínimos de cerca de seis meses. Para la mayoría de los máximos y mínimos alcanzados, superan los umbrales superior e inferior de significancia.

El máximo valor se corresponde con una correlación de 0,158 (*lag* 15), mientras que el mínimo presenta un valor de correlación de -0,131 (*lag* -53). Lo anterior indica que, en promedio, cada seis meses la precipitación está explicada significativamente (en la mayoría de los ciclos) por las fluctuaciones del índice.

Finalmente, y respecto a IOD (Figura 4.23), los máximos y mínimos significativos de correlación alcanzados se presentan para rezagos positivos de 1 mes (correlación de 0,1) y 8 meses (correlación de -0,098), respectivamente. Si bien los ciclos no son tan marcados (como por ejemplo, respecto a ONI), la significancia hace suponer que, a pesar de la distancia con el océano Índico, su influencia tiene cierta relevancia sobre la ocurrencia de las precipitaciones.

La relación entre los índices de variabilidad climática y las precipitaciones es fuerte o débil de acuerdo con la influencia que los primeros puedan ejercer sobre las lluvias de la zona. En este sentido, es esperable que las relaciones más fuertes no sólo provengan de índices con correlaciones significativas, sino que sus oscilaciones en el tiempo (rezagos) sean cíclicas y no producto del azar.

En cuanto a las precipitaciones y de acuerdo con el análisis de los correlogramas (Figuras 4.16 a 4.23), los índices con los que más se relaciona son ONI, SOI, AAO y PDO, este orden por magnitud de significancia y periodicidad de ciclos. Lo anterior es respaldado por estudios sobre modos de variabilidad climática en la zona, como Masiokas et al., (2019), enfatizando sobre la influencia de ENSO (ONI) y Castino et al., (2017) y Lauro et al., (2019) respecto a PDO y AAO.

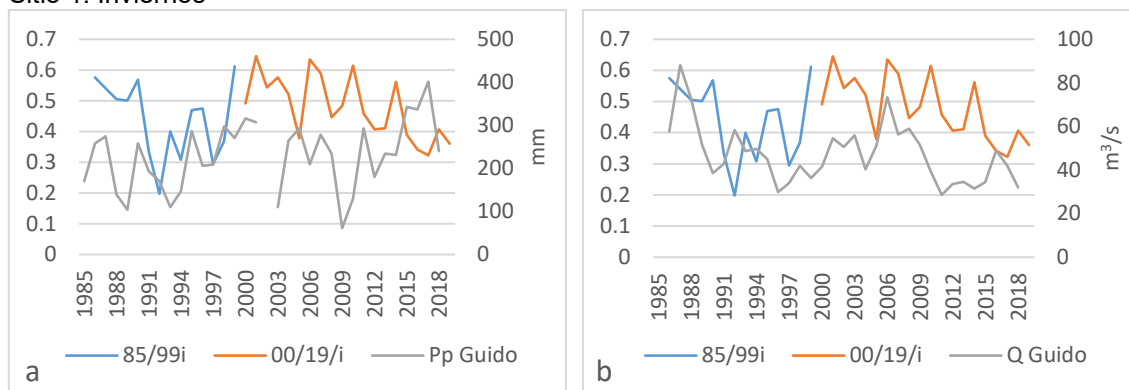
Los análisis establecen relaciones importantes para facilitar la comprensión acerca de las relaciones temporales entre los vínculos de circulación entre la atmósfera y el océano, versus la ocurrencia de precipitaciones en la zona de estudio.

Análisis multitemporal del estado de la vegetación en el sitio Ramsar

Posterior al cálculo de NDVI anual para los períodos de veranos e inviernos entre 1985 – 1999 y 2000 – 2019 (70 imágenes *raster*), se ejecutó una compilación para agruparlas en *rasters* multibanda. De esta forma, mediante las herramientas descritas en la metodología, se analizaron las variaciones temporales y espaciales por estaciones y perfiles (sitios) en la región (Figura 4.3).

Los *rasters* multibanda resultantes fueron: veranos 1985 – 1999, inviernos 1985 – 1999, veranos 2000 – 2019 e inviernos 2000 – 2019. La comparación temporal de NDVI (sitio 1 - períodos inviernos y veranos del 85/99 y 00/19) versus precipitaciones y caudales medios estacionales (mismo período que NDVI) en la estación Guido (1413) se presenta en la Figura 4.24.

Sitio 1. Inviernos



Sitio 1. Veranos

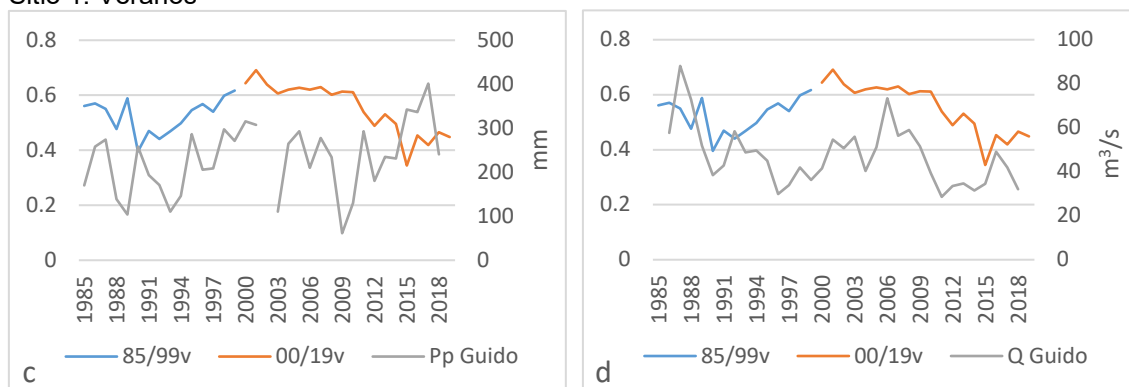


Figura 4. 24. Comparación de curvas de NDVI (líneas azules y naranjas) versus precipitaciones (a, c) y caudales medios estacionales (b, d) en la estación Guido (1413) para el píxel del sitio 1 correspondiente (Figura 4.4).

El sitio 1 (Figura 4.3) se localiza sobre una sección de escorrentía en el cauce del río Mendoza (zona esperable para elevada actividad fotosintética). La relación entre los NDVI estacionales versus precipitación es más acentuada durante el invierno que el verano (Figura 4.24a, 4.24c) dado que la zona del sitio 1 se encuentra cercana al cauce del río. Esto se complementa analizando los caudales, los cuales tienen mayor relación con el NDVI de invierno que con el verano (Figura 4.24b).

Esta relación del NDVI con los caudales podría deberse a que, en invierno, la actividad de uso de agua en el oasis irrigado es menor, por lo que la actividad fotosintética de la zona del sitio 1 está más relacionada al flujo de agua superficial. Caso contrario sucede en el verano (Figura 4.24d), cuya relación previa al año 2000 disminuye hacia el segundo período, denotando un mayor consumo de agua para irrigación. En la Figura 4.25, se presentan los perfiles transversales de tendencia de NDVI para el sitio 1 en los cuatro períodos considerados.

Ubicación sitio 1 (Figura 4.3).

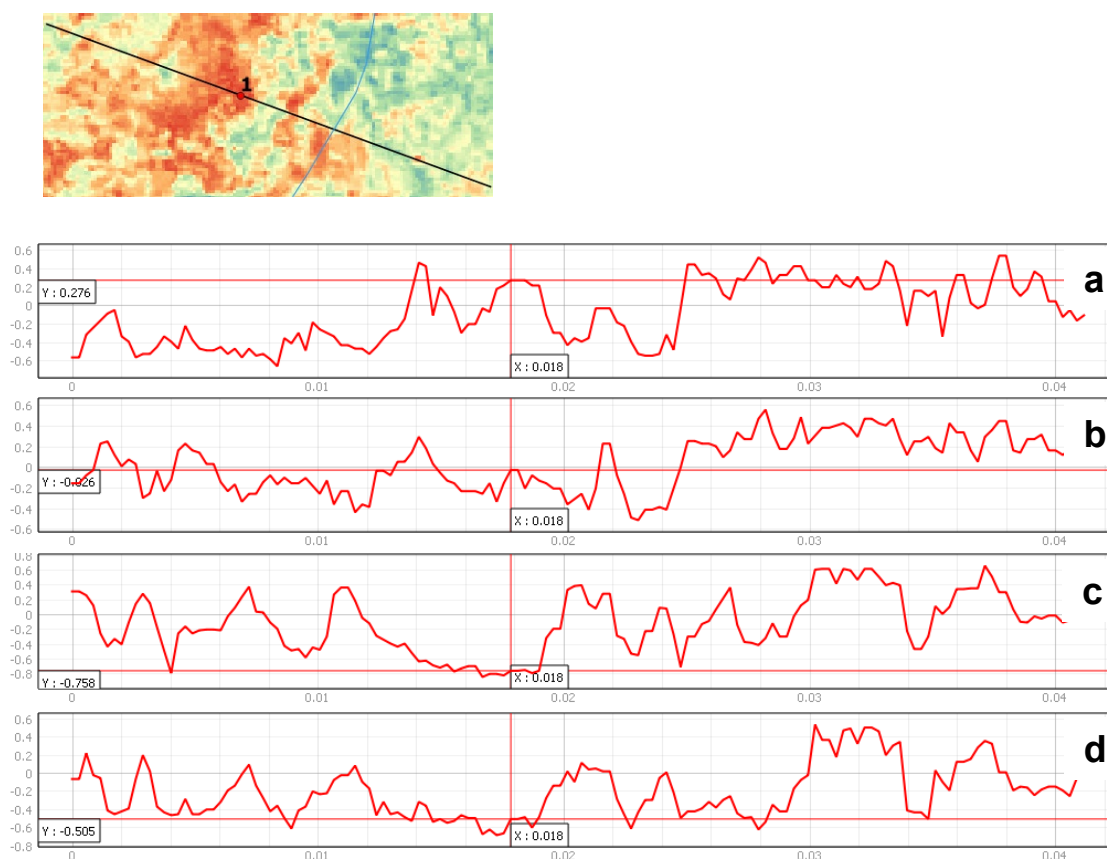


Figura 4. 25. Perfiles transversales de los diferentes Tau de NDVI (tendencia) para el sitio 1. La imagen representativa de la parte superior izquierda muestra una imagen raster Tau (tendencia) de NDVI para los veranos de 00/19. Perfiles de la sección inferior: a) Tau NDVI 85/99 verano, b) Tau NDVI 85/99 invierno, c) Tau NDVI 00/19 verano, d) Tau NDVI 00/19 invierno.

Los perfiles transversales de tendencia de NDVI (Figura 4.25) no muestran un patrón homogéneo del cauce, ya que el sitio 1 se ubica sobre una zona de bajos inundables sin flujo definido. Sin embargo, el sitio 2 (ubicado sobre el arroyo Tulumaya), presenta un patrón definido de NDVI, indicando una disminución de la actividad fotosintética asociada al cauce y la franja riparia (Figura 4.26). En este sitio, la actividad fotosintética se manifiesta como un patrón rojo (tendencia negativa) de NDVI (imagen superior de la Figura 4.26).

Los perfiles del sitio 2 indican la presencia de una zona riparia con valores bajos de NDVI. En este caso representados por el Tau de tendencia de Mann-Kendall. Lo anterior indica que para los cuatro períodos considerados (Figura 4.26) la tendencia de actividad fotosintética es negativa.

Ubicación punto 2 (Figura 4.3).

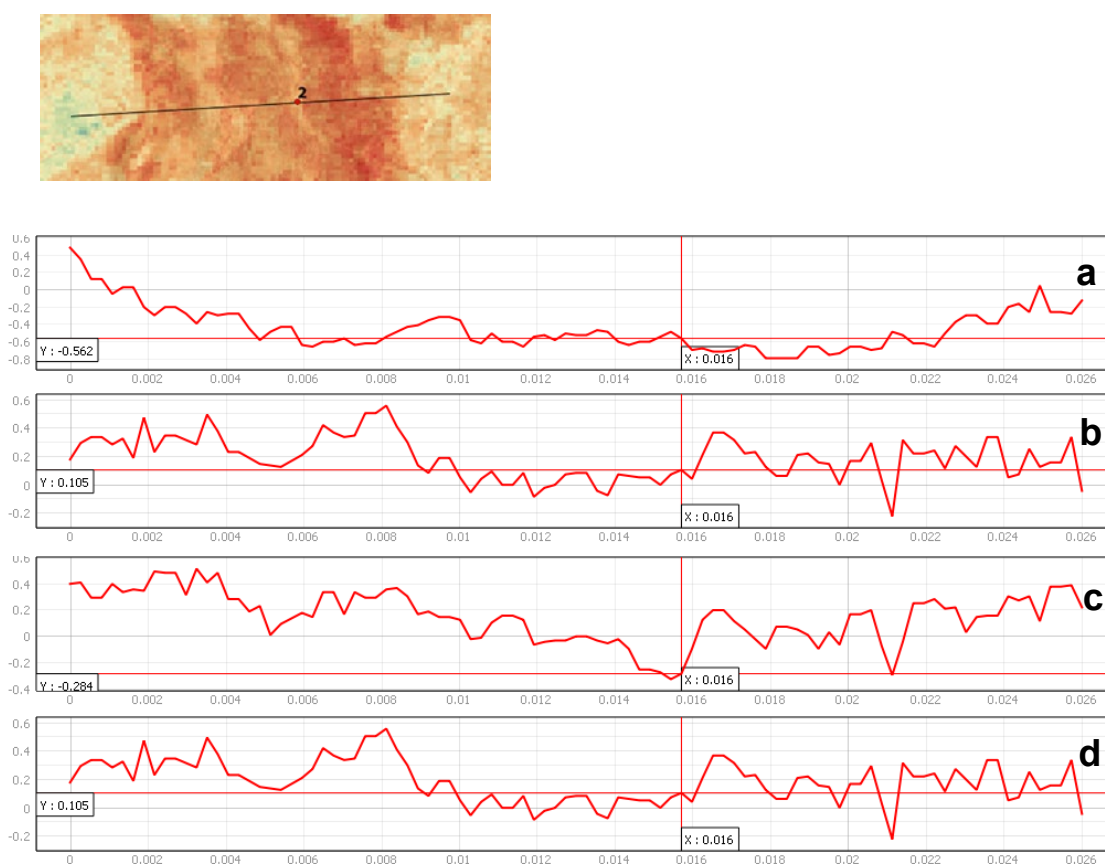


Figura 4. 26. Perfiles transversales de los diferentes Tau de NDVI (tendencia) para el sitio 2. La imagen representativa de la parte superior izquierda muestra una imagen raster Tau (tendencia) de NDVI para los veranos de 00/19. Perfiles de la sección inferior: a) Tau NDVI 85/99 verano, b) Tau NDVI 85/99 invierno, c) Tau NDVI 00/19 verano, d) Tau NDVI 00/19 invierno.

Para el resto de los sitios (3 al 10), tanto los resultados gráficos de contrastes entre NDVI versus caudales y precipitaciones (p. ej., Figura 4.24), como los perfiles transversales (Figura 4.25 y 4.26), la vinculación de NDVI versus precipitación es más fuerte en inviernos y veranos para el período posterior al año 2000 (situación promedio observada).

Por otra parte, y respecto a los caudales, la correlación es más evidente hacia los veranos anteriores al año 2000 (previo a los aprovechamientos de represamiento en Potrerillos, río Mendoza). Por su parte, las tendencias negativas de NDVI en las franjas riparias, indican la fuerte conexión entre las zonas de humedales y la disminución de las escorrentías durante los años considerados.

Cabe destacar que la relación entre la zona de humedales y los caudales va disminuyendo con la distancia. Esto quiere decir que, aguas abajo del sitio 8 (Figura 4.3), la ausencia o escasa presencia de escorrentía hace que la actividad fotosintética comience a depender más de las precipitaciones que de los caudales. Por esta razón, entre los sitios 8, 9 y 10, la tendencia de NDVI no muestra disminuciones importantes (lo que sugiere que ya era una zona degradada mucho antes que el período de años considerado).

Como parte de la correlación entre los cuatro *rasters* multibanda de NDVI (veranos 1985 – 1999 e inviernos 2000 – 2019), versus precipitación y caudal medio mensual en Guido y El Encón (sólo caudal), se obtuvieron *rasters* monobanda de correlación de Pearson (r). Una de las mayores utilidades de este producto, radica en la visualización de patrones espaciales, los cuales indicarían el estado correlativo multitemporal del humedal (actividad fotosintética por NDVI) versus precipitaciones y caudales. En las Figuras 4.27, 4.28 y 4.29, se presentan las correlaciones (Pearson) multitemporales entre NDVI y precipitación en Guido, caudal en Guido y caudal en El Encón, respectivamente, para cuatro escenarios temporales (a, b, c y d, descritos en cada imagen posterior).

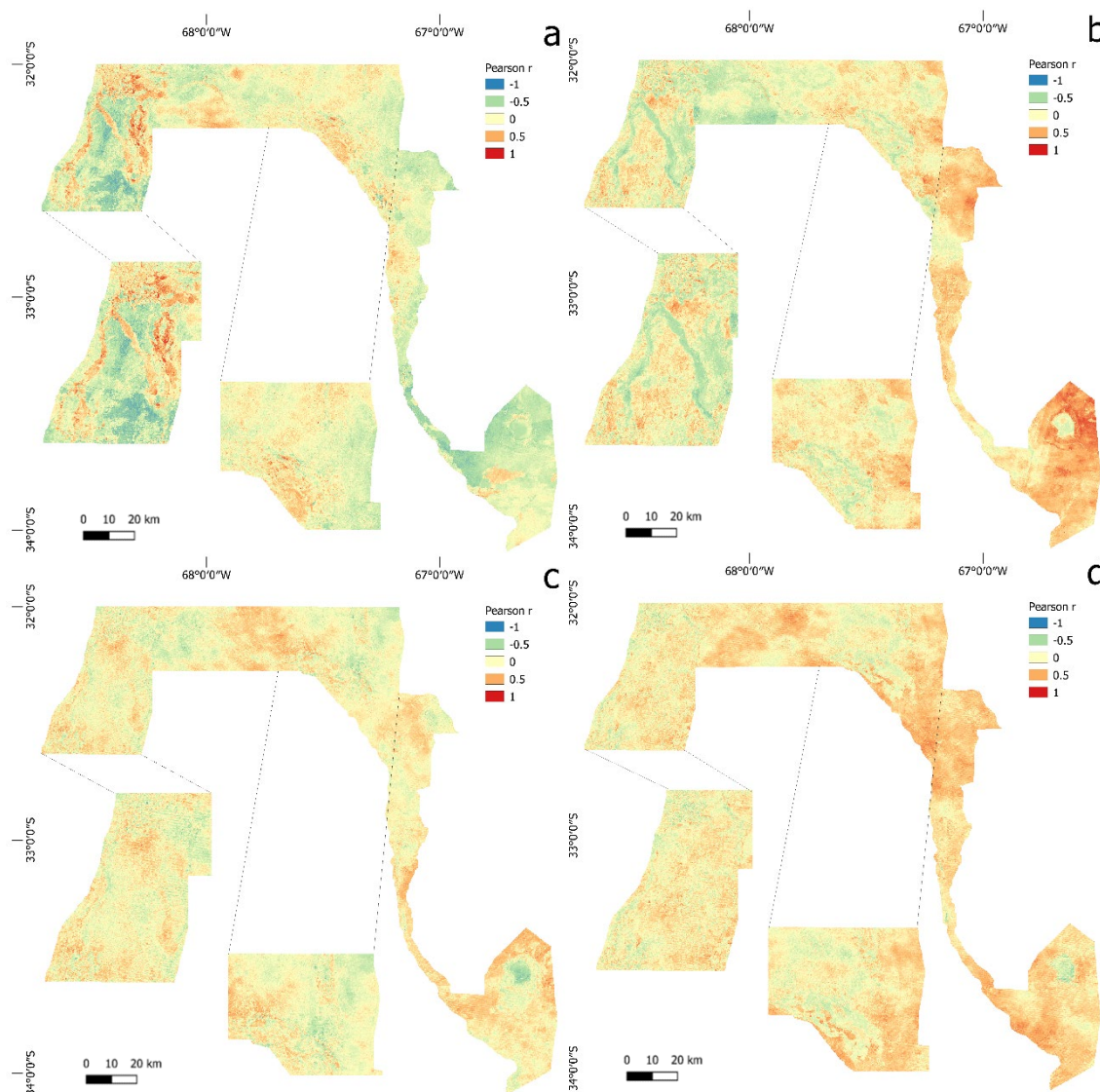


Figura 4. 27. Correlación (Pearson) de *rasters* multibanda entre Precipitación media estacional (Guido) y NDVI para los períodos: a) Inviernos 1985-1999, b) Veranos 1985-1999, c) Inviernos 2000-2019 y d) Veranos 2000-2019. Las zonas señaladas por líneas, indican las dos regiones más representativas para la observación de las diferencias de correlación (representadas a mayor escala).

La correlación entre la precipitación y NDVI en secciones seleccionadas (Figura 4.27a) es positiva, coincidiendo como fuente alterna de agua en época de estiaje de caudales (invierno). Por su parte, hacia el verano y antes del año 2000 (Figura 4.27b), la relación es negativa, es decir, a mayor actividad fotosintética, menor precipitación; esto indica la relación indirecta de relativa independencia de los humedales locales ante las precipitaciones, sugiriendo así la vinculación con las escorrentías. Por otro lado, en los escenarios posteriores al año 2000 (Figuras 4.27c y 4.27d) desaparecen en gran medida los patrones previos a este año, indicando una posible degradación de los humedales y una homogeneización de regiones que comienzan a relacionarse positivamente con las precipitaciones locales.

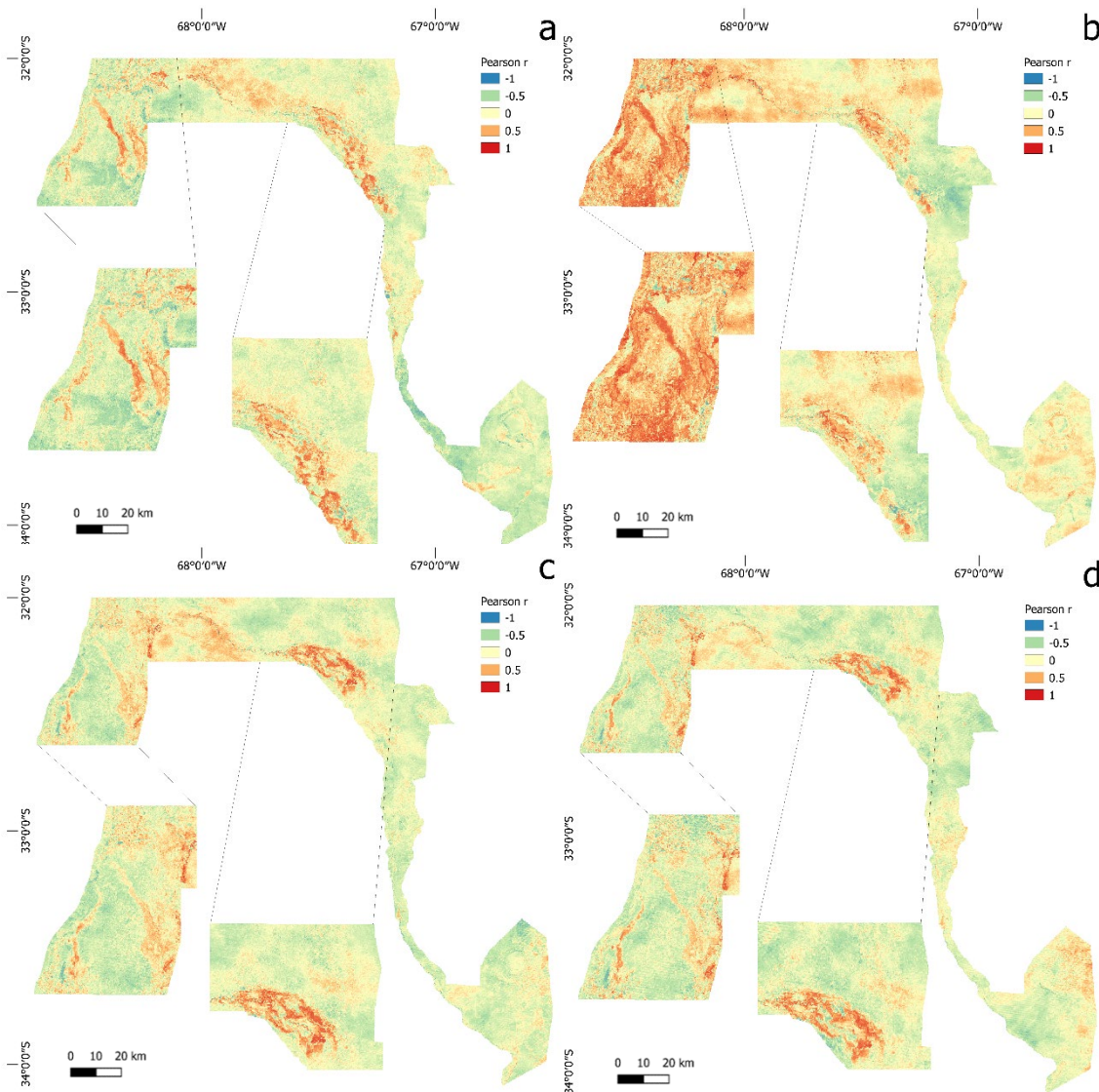


Figura 4. 28. Correlación (Pearson) de rasters multibanda entre el caudal medio estacional (Guido – 1413) y NDVI para los períodos: a) Inviernos 1985-1999, b) Veranos 1985-1999, c) Inviernos 2000-2019 y d) Veranos 2000-2019. Las zonas señaladas por líneas indican las dos regiones más representativas para la observación de las diferencias de correlación (representadas a mayor escala).

Relacionado con los caudales en Guido (Figura 4.28), la actividad fotosintética en las franjas riparias se manifiesta con colores rojizos (correlación positiva) en los cuatro períodos considerados. Sin embargo, la relación se hace más fuerte y extensiva en las zonas inundables de verano previas al año 2000 (Figura 4.28b). Luego de este año, es notable la disminución de vinculación entre ambas variables, sobre todo en verano (Figura 4.28d), donde incluso se visualizan áreas que ya no presentan correlación positiva (sección media inferior del sitio Ramsar). Lo anterior podría indicar una forma de degradación del humedal debido a la atenuación de pulsos de inundaciones por causas antrópicas (represas aguas arriba).

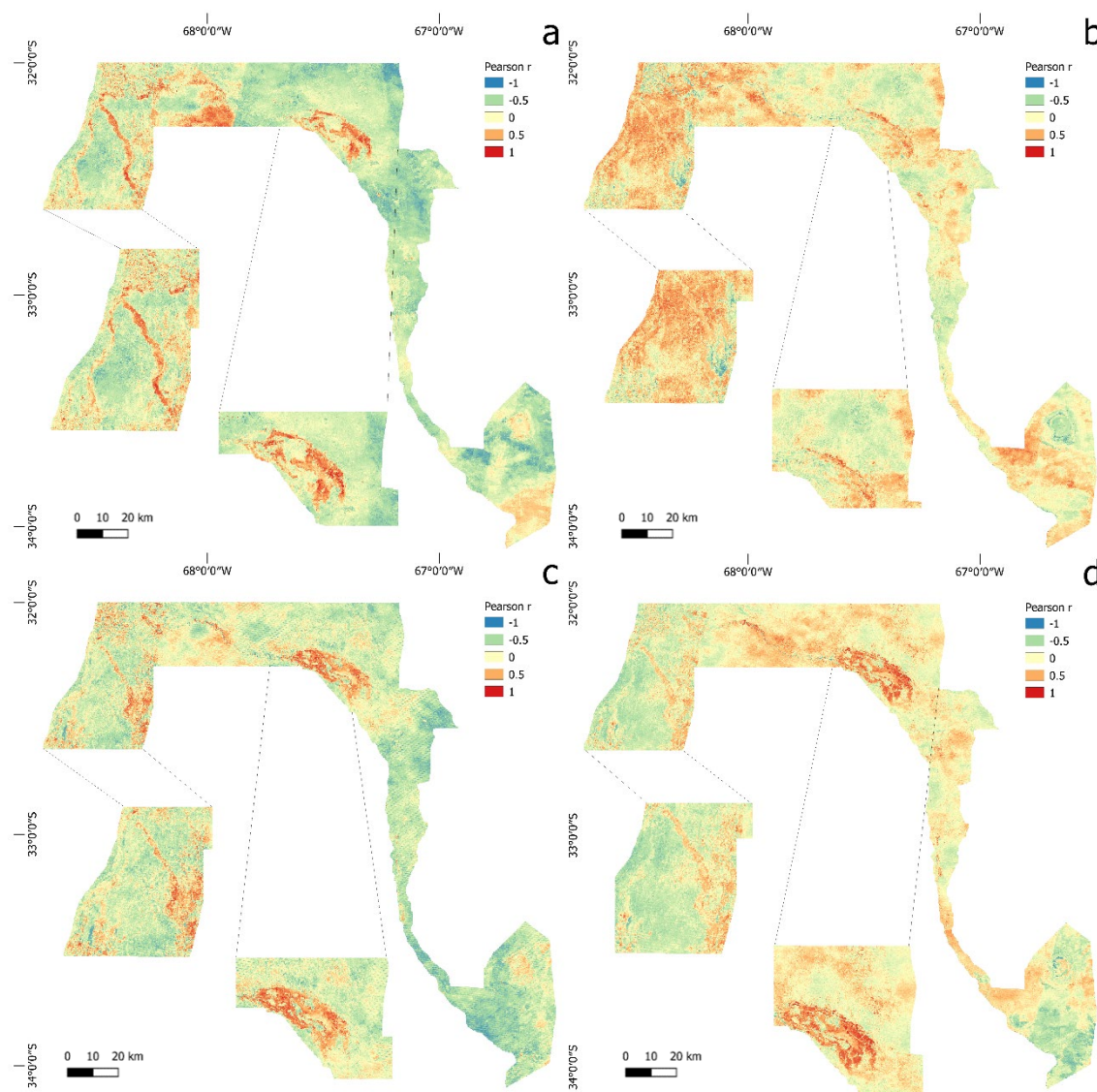


Figura 4. 29. Correlación (Pearson) de rasters multibanda entre el caudal medio estacional (El Encón – 1219) y NDVI para los períodos: a) Inviernos 1993-1999, b) Veranos 1991-1999, c) Inviernos 2003-2018 y d) Veranos 2001-2019. Las zonas señaladas por líneas indican las dos regiones más representativas para la observación de las diferencias de correlación (representadas a mayor escala).

El NDVI se contrastó (Figura 4.29) con los caudales registrados en la estación El Encón (1219) situado dentro del sitio Ramsar (Figura 4.1). Esta estación recoge los caudales de los ríos Mendoza y San Juan, ubicándose a las márgenes de este último. En una situación similar a la mostrada en la Figura 4.29, la actividad fotosintética de las franjas riparias del humedal responden positivamente a la ocurrencia de caudales en la zona, siendo el verano la estación con mayor correlación (dado el aumento de escorrentías propias de la temporada). Una de las zonas más resaltantes del sitio Ramsar lo representa la mancha rojiza del noreste, la cual se trata de uno de los relictos verdes del humedal (Figura 4.29). Aguas abajo de esta zona, la correlación disminuye o desaparece, indicando una posible desecación de los humedales por desvinculación con el flujo de agua superficial.

Si bien la zona representa el área topográficamente más baja de la región es posible que, dentro del ciclo hidrológico natural, las aguas subterráneas también jueguen un papel fundamental. Sin embargo, queda en evidencia la alteración de la escorrentía superficial aguas arriba y por acción humana (uso del recurso hídrico en las ciudades y oasis). Como referencia adicional, en la Figura 4.30 se presenta la imagen del índice topográfico de humedad (TWI), calculado a partir del modelo digital de elevación MDE de 30 m de la zona.

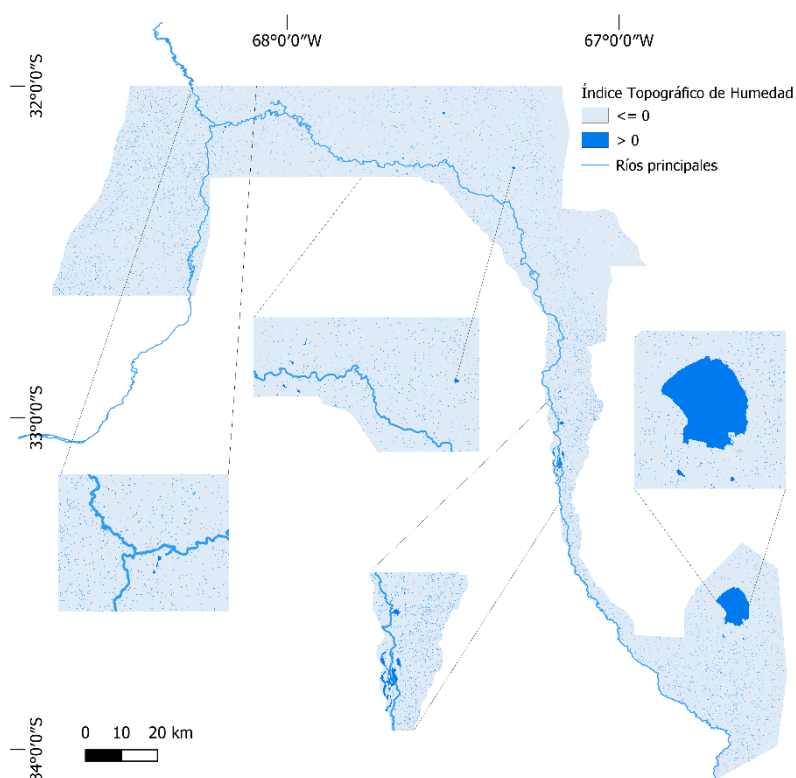


Figura 4. 30. Índice topográfico de humedad en la zona de estudio. Las zonas señaladas por líneas indican las cuatro regiones más representativas para la observación del TWI (representadas a mayor escala).

Topográficamente, este índice permite establecer las zonas factibles de ser inundadas (valores > 1). De esta forma, los sitios de humedales y terrenos inundables resaltan entre los demás. Si bien el sitio Ramsar en estudio presenta elevada homogeneidad fisiográfica y altitudinal, el TWI detecta las zonas inundables que aún concuerdan con los relictos del humedal en la zona (Figura 4.31), a excepción de los ubicados hacia la porción inferior de la región.

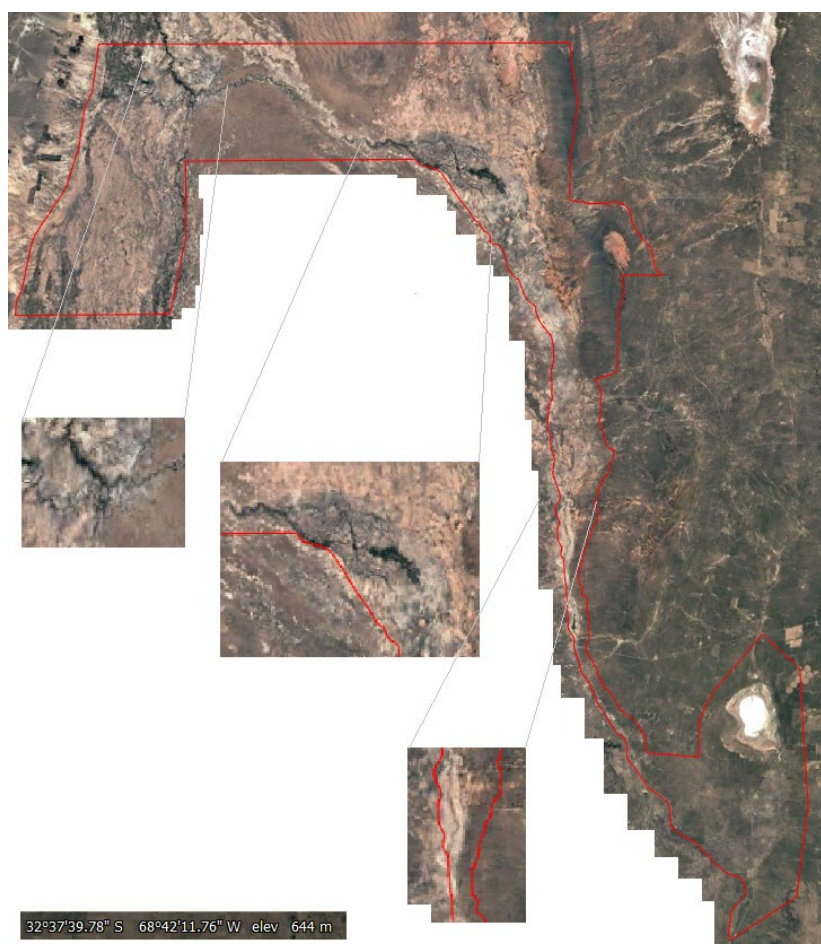


Figura 4. 31. Imagen de Landsat/Copernicus (diciembre de 2019). Fuente: Google Earth Pro (2021). Referencia espacial (esquina inferior izquierda) basada sobre el extremo más occidental del sitio Ramsar (polígono rojo). Las zonas señaladas por líneas grises indican las tres regiones más representativas para la observación del estado de conservación del sitio Ramsar (representadas a mayor escala).

CONCLUSIÓN

La vinculación entre elementos de variabilidad hidroclimática en el humedal de estudio permitió establecer un panorama acerca de las condiciones naturales recientes de variables como precipitación, temperatura y caudales de la zona de estudio. De esta forma, en el análisis de las fluctuaciones de dichas variables en un contexto espacial y temporal, resaltan las vinculaciones físicas del sitio Ramsar versus la variabilidad natural del clima, el régimen de escorrentía y las evidencias que arroja sobre los impactos de usos antrópicos aguas arriba.

Como parte de los análisis espectrales, el régimen térmico se vincula principalmente a una ventana de variabilidad anual, propia de la posición geográfica de la región. Relacionado a las precipitaciones y adicional a la variabilidad anual, toma especial relevancia la vinculación con modos de variabilidad como ENSO y PDO (sobre todo en estaciones aguas abajo de la cordillera). En este sentido, las ondoletas mostraron vinculaciones con eventos El Niño moderados a fuertes, alrededor de 1970, 1990 y 2008. En cuanto a los caudales, adicional al ciclo hidrológico anual, resaltan densidades espectrales elevadas para 6 meses y 4,8 años (esta última vinculada a ciclos de ENSO).

En la región, los ciclos de ENSO negativo (La Niña) representan una disminución de nevadas en la cordillera, lo que se traduce en una disminución de la producción de escorrentía aguas abajo.

El análisis de anomalías muestra tendencias positivas de temperatura, cuyas pendientes crecientes concuerdan con los resultados de análisis recientes del IPCC (2021) sobre el cambio climático. Lo anterior contrasta con la precipitación anual, la cual presentó pendientes más elevadas (mayores en las positivas que en las negativas) para el período considerado. En cuanto a los caudales, los ciclos anómalos entre tres y cinco años sugieren una influencia de ENSO en la zona, la cual arroja también tendencias decrecientes (siendo superiores para las negativas sobre las positivas).

Por su parte, el análisis de anomalías decrecientes de caudales aplicados sobre El Encón (dentro del sitio Ramsar) sugiere una combinación entre elementos de variabilidad hidroclimática natural e impactos de origen antrópico aguas arriba. Dicha combinación podría estar incidiendo negativamente en la afluencia de agua para el mantenimiento de los humedales en estudio.

Dentro del análisis de índices climáticos, la consideración de varios rezagos o *lags* mensuales permitió establecer la vinculación de las precipitaciones de la región con modos de variabilidad climática como ONI, SOI, AAO y PDO, alcanzando una relación explicativa de hasta el 36 % de la variabilidad. El análisis de estos índices versus las series de precipitaciones puede ayudar a generar una mayor comprensión sobre la variabilidad climática en la zona.

Por último y como parte del análisis multitemporal de la vegetación en el sitio Ramsar, el NDVI presenta mayor correlación positiva, temporal y espacial con los caudales en épocas estivales. Sin embargo, la relación inversa que existe con la precipitación y la disminución que se observa luego del año 2000 sugieren que la afluencia de menores escorrentías hacia el humedal está incidiendo negativamente sobre la actividad fotosintética de la zona. Dicha pérdida de relación NDVI-caudal presenta un gradiente espacial de aguas arriba a aguas abajo, indicando indirectamente la salud de los ecosistemas de humedales en el sitio Ramsar estudiado.

Derivado de los distintos análisis realizados, el sitio Ramsar de estudio es especialmente sensible a la variabilidad hidroclimática, ya sea por las fluctuaciones termométricas encontradas, la ocurrencia y tendencia de

precipitaciones, o por los cambios en las escorrentías que pueden alterar naturalmente la salud de los ecosistemas de humedales aguas abajo.

REFERENCIAS

Abdi, A. Vrieling, A. Yengoh, G. Anyamba, J. Seaquist, C. Ummenhofer, C. y Ardö, J. (2016). The El Niño-La Niña cycle and recent trends in supply and demand of net primary productivity in African drylands. *Climatic Change* 138.1-2 (2016): 111-125. Consultado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-016-1730-1>

Addinsoft. (2016). XLSTAT Versión 2016.02.28451. Copyright Addinsoft 1995-2022. Consultado de: <http://www.xlstat.com>

Beigt, D. y Piccolo, M. (2011). Tendencia de la temperatura en una planicie de marea del estuario de Bahía Blanca (Período 2000-2007). *Investigaciones Geográficas*, n°48. Pp. 253 – 271. ISSN: 0213-4691

Boers, N. Goswami, B. Rheinwalt, A. Bookhagen, B. Hoskins, B. y Kurths, J. (2019). Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections. *Nature* 566, 373–377 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0872-x>

Boninsegna, J. y Villalba, R. (2006). Los escenarios de Cambio Climático y el impacto en los caudales. Documento sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan en escenarios de Cambio Climático. Primer informe a la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 19 pp. Consultado de: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-nta_documento_marco_sobre_la_oferta_hdrica_en_los_oa.pdf

Bureau of Meteorology, BOM. (2021). Madden-Julian Oscillation (MJO). Australian Government. Página web en línea. Consultado de: <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>

Bureau of Meteorology, BOM. (2021b). The Indian Ocean Dipole (IOD). Australian Government. Página web en línea. Consultado de: <http://www.bom.gov.au/climate/enso/history/In-2010-12/IOD-what.shtml>

Castino, F. Bookhagen, B. y Strecker, M. (2017). Oscillations and trends of river discharge in the southern Central Andes and linkages with climate variability. *Journal of Hydrology* 555 (2017) 108-124. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.001>

Climate Prediction Center, CPC. (2021). Frequently Asked Questions About El Niño and La Niña. Página web en línea. Consultado de: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#NINO

Compagnucci, R. y Vargas, W. (1998). Interannual variability of Cuyo rivers streamflow in Argentinean Andean mountains and ENSO events. *International Journal of Climatology*. 18:1593-1609.

Dahlman, L. (2009). Climate Variability: Southern Oscillation Index. Página web en línea. Consultado de: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-southern-oscillation-index>

Departamento General de Irrigación, DGI. (2019). El pronóstico en detalle. Gobierno de la provincia de Mendoza. Página web en línea. Consultado de: <https://www.irrigacion.gov.ar/web/2019/10/08/el-pronostico-en-detalle/>

Departamento General de Irrigación, DGI. (s/f). Balance hídrico del río Mendoza. Gobierno de la provincia de Mendoza, Argentina.

Doblas-Reyes, F. Sörensson, A. Almazroui, M. Dosio, A. Gutowski, W. Haarsma, R. Hamdi, R. Hewitson, B. Kwon, W-T. Lamptey, B. Maraun, D. Stephenson, T. S. Takayabu, I. Terray, L. Turner, A. y Zuo, Z. (2021). Linking Global to Regional Climate Change. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Consultado de: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_10.pdf

Earth Observatory NASA. (2021). Measuring Vegetation (NDVI & EVI). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Página web en línea. Consultado de: https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php

Estévez, J. Bellido-Jiménez, J. Liu, X. y García-Marín, A. (2020). Monthly Precipitation Forecasts Using Wavelet Neural Networks Models in a Semiarid Environment. *Water* 2020, 12, 1909. Doi: <https://doi.org/10.3390/w12071909>

Farr, T. Rose, P. Caro, E. Crippen, R. Duren, R. Hensley, S. Kobrick, M. Paller, M. Rodriguez, E. Rot, L. Seal, D. Shaffer, S. Shimada, J. Umland, J. Werner, M. Oskin, M. Burbank, D. y Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission: Reviews of Geophysics, v. 45, no. 2, RG2004. Doi: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Gallegati, M. (2018). A systematic wavelet-based exploratory analysis of climatic variables. *Climatic Change*. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2172-8>

Genesse, A. y Melesse, A (2019). Temporal relationships between time series CHIRPS-rainfall estimation and eMODIS-NDVI satellite images in Amhara Region, Ethiopia. *Extreme Hydrology and Climate Variability*. Pages 81-92. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00008-7>

Google Earth Engine, GEE. (2021). ee.Reducer.kendallsCorrelation. Página web en línea. Consultado de: <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-reducer-kendallsCorrelation>

Google Earth Pro. (2021). Aplicación de escritorio para consulta espacial. Localización: 32°07'34"S - 68°12'35"O. Altura de ojo: 313 km

Gottschalck, J. y Higgins, W. (s/f). Madden Julian Oscillation Impacts. NOAA / NWS / NCEP Climate Prediction Center. Documento web. Consultado de: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/MJO_1page_factsheet.pdf

Grafton, Q. y Wittwer, G. (2021). Temperature–Rainfall Anomalies and Climate Change: Possible Effects on Australian Agriculture in 2030 and 2050. In: Biswas, A.K., Tortajada, C. (eds) Water Security Under Climate Change. Water Resources Development and Management. Springer, Singapore. Doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-5493-0_17

Grothe, P. Cobb, K. Liguori, G. Di Lorenzo, E. Capotondi, A. Lu, Y. Cheng, H. Edwards, L. Southon, J. Santos, G. Deocampo, D. Lynch-Stieglitz, J. Chen, T. Sayani, H. Thompson, D. Conroy, J. Moore, A. Townsend, K. Hagos, M. O'Connor, G. y Toth, L. (2019), Enhanced El Niño-Southern Oscillation variability in recent decades. Geophysical Research Letters. Doi: <https://doi.org/10.1029/2019GL083906>

Gupta, A. y McNeil, B. (2012). Variability and Change in the Ocean. Chapter 6, pages 141 - 165. The Future of the World's Climate. Second Edition. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386917-3.00006-3>

Guzinski, R. (2020). Temporal/Spectral Profile Tool. Plots profile from *raster* bands. Based on Profile Tool. Consultado de: <https://github.com/SciTools/nc-time-axis> y aplicado mediante QGIS 3.10.12 [<https://qgis.osgeo.org>]

Hammer, Ø. Harper, D. y Ryan, P. (2001). PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9 pp. Consultado de: <https://www.folk.uio.no/ohammer/past>

Huang, S. Tang, L. Hupy, J. Wang, Y. y Shao, G. (2020). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.* 32, 1–6 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (s/f). Variabilidad Climática. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia. Consultado de: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/variabilidad-climatica>

Instituto Nacional del Agua, INA. Centro Regional Andino, CRA. (2020). Red Hidrometeorológica Telemétrica. Ministerio de Obras Públicas, República Argentina. Consultado de: <https://www.ina.gov.ar/cra/index.php?seccion=6>

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2021). Annex VII: Glossary [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge

University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2215–2256. Doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.022>

Johnson, N. (2020). Meet ENSO's neighbor, the Indian Ocean Dipole. NOAA Climate.gov. Página web en línea. Consultado de: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/meet-enso%E2%80%99s-neighbor-indian-ocean-dipole>

Jurgiel, B. Verchere, P. Tourigny, E. y Becerra, J. (s/f). Profile tool 4.1.8. Consultado de: <https://github.com/PANOimagen/profiletool> y aplicado mediante QGIS 3.10.12 [<https://qgis.osgeo.org>].

Karumuri, A. Behera, S. y Rao, S. (2007). El Niño Modoki and its teleconnection. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. Doi: <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>

Kopecky, M. Macek, M. y Wild, J. (2021). Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. *Science of the Total Environment*, 757:2021. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143785>

Lauro, C. (2016). Estudio del comportamiento del régimen fluvial de las cuencas del oeste argentino y su vinculación con el cambio climático. Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de Doctora en Ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

Lauro, C. Vich, A. y Moreiras, S. (2019). Streamflow variability and its relationship with climate indices in western rivers of Argentina, *Hydrological Sciences Journal*, 64:5, 607-619. Doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1594820>

Lauro, C. Vich, A. y Moreiras, S. (2019). Streamflow variability and its relationship with climate indices in western rivers of Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 64:5, 607-619. Doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1594820>

Lee, D. Petersen, M. y Lin, W. (2019). The Southern Annular Mode and Southern Ocean Surface Westerly Winds in E3SM. *Earth Sp. Sci.* 6, 2624–2643.

Masiokas, M. Cara, L. Villalba, R. Pitte, P. Luckman, B. Toum, E. Christie, D. Le Quesne, C. y Mauget, S. (2019). Streamflow variations across the Andes (18°–55°S) during the instrumental era. *Sci Rep* 9, 17879 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53981-x>

Masiokas, M. Iba, R. Luckman, B. y Mauget, S. (2010). Intra-to Multidecadal Variations of Snowpack and Streamflow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30o and 37oS. *J. of Hydrometeorology* 11:822-831. Doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-53981-x>

Masiokas, M. Villalba, R. Luckman, B. Le Quesne C. y Aravena, J. (2006). Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951 – 2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. *Journal of Climate*. 19:6334–52. Doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI3969.1>

Mentaschi, L. Vousdoukas, M. Voujouvalas, E. Dosio, A. y Feyen, L. (2017). Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns. *Geophysical Research Letters* Volume 44, Issue 5 p. 2416-2426. Doi: <https://doi.org/10.1002/2016GL072488>

Met Office. (2021). Pacific Decadal Oscillation (PDO). Página web en línea. Consultado de: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/oceans/pacific-decadal-oscillation>

Moustahfid, H. Hendrickson, L. Arkhipkin, A. Pierce, G. Gangopadhyay, A. Kidokoro, H. Markaida, U. Nigmatullin, C. Sauer, W. Jereb, P. Pecl, G. Chesnais, T. Ceriola, L. Lazar, N. Firmin, C. y Laptikhovsky, V. (2022). Ecological-Fishery Forecasting of Squid Stock Dynamics under Climate Variability and Change: Review, Challenges, and Recommendations. *Fisheries Research* 253. Doi: <https://doi.org/10.1080/23308249.2020.1864720>

Musi, C. (2015). Un nuevo fenómeno climático: el Niño Modoki. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, República Argentina. Consultado de: <https://inta.gob.ar/noticias/un-nuevo-fenomeno-climatico-el-nino-modoki>

National Center for Atmospheric Research, NCAR. (2021). Climate Data. Multivariate ENSO Index. Página web en línea. Consultado de: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/multivariate-ens-index>

National Centers for Environmental Information, NCEI. (2021). Anomalies vs. Temperature. National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. Consultado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/dyk/anomalies-vs-temperature>

National Centers for Environmental Information, NCEI. (2021b). Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures. National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. Consultado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/ens/index/sst/>

National Centers for Environmental Information, NCEI. (2021c). Teleconnections. National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. Consultado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/>

National Centers for Environmental Information, NCEI. (2021d). Oceanic Niño Index (ONI). National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. Consultado de: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/ens/sst#oni>

National Centers for Environmental Information, NCEI. (2021e). Pacific Decadal Oscillation (PDO). National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. Consultado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>

National Centers for Environmental Information, NCEI. (2021f). Southern Oscillation Index (SOI). National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. Consultado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>

National Weather Service, NWS. (2021). What is El Niño-Southern Oscillation (ENSO)?. Página web en línea. Consultado de: <https://www.weather.gov/mhx/ensowhat>

Newman, M. Alexander, T. Ault, K. Cobb, C. Deser, E. y Di Lorenzo, E. (2016). The Pacific Decadal Oscillation, Revisited. *Journal of Climate* 29(12):160310134237003. Doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0508.1>

Nurdiati, S. Khatizah, E. Najib, M. y Hidayah, R. (2021). Analysis of rainfall patterns in Kalimantan using fast fourier transform (FFT) and empirical orthogonal function (EOF). *Journal of Physics: Conference Series*. 1796 (2021) 012053. IOP Publishing. Doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1796/1/012053>

Org. Apache Commons. (2021). Class KendallsCorrelation. [org.apache.commons.math3.stat.correlation](https://commons.apache.org/math3/stat/correlation). Página web en línea. Consultado de: <https://commons.apache.org/proper/commons-math/javadocs/api-3.6/org/apache/commons/math3/stat/correlation/KendallsCorrelation.html>

Panel Intergubernamental del Cambio Climático, IPCC. (2013). Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. ISBN 978-92-9169-338-2.

Panel Intergubernamental del Cambio Climático, IPCC. (2021). Regional Fact sheet – Central and South America. Sixth Assessment Report. Working Group I – The Physical Science Basis. Consultado de: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC_AR6_WGI_Regional_Fact_Sheet_Central_and_South_America.pdf

Pettorelli, N. Olav, J. Mysterud, A. Gaillard, J. Tucker, C. y Stenseth, N. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*. Volume 20, Issue 9, September 2005, Pages 503-510. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>

Physical Sciences Laboratory, PSL. (2021). Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2). National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. Página web en línea. Consultado de: <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>

Poblete, A. y Castro, M. (2021). Influencia del ENSO en los factores y agentes climáticos que inciden en las precipitaciones níveas de los Andes Áridos. *Revista de Geografía Estudios Socioterritoriales*. Núm. 29 (2021). Doi: <https://doi.org/10.37838/unicen/est.29-078>

Poblete, A. y Vera, M. (2017). Cuantificación de la incidencia del enso en las nevadas de los Andes Áridos de Sudamérica en el periodo 1909-2015. Vol. 14. Núm. 27 (2017). Doi: <http://dx.doi.org/10.30972/geo.14272121>

Prensa Gobierno de Mendoza. (2010). Jaque decretó la emergencia hídrica. Página web en línea. Consultado de: <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/jaque-decreto-la-emergencia-hidrica/>

Prensa Gobierno de Mendoza. (2019). Pronóstico de Caudales 2019-2020: habrá 11% menos de agua que la temporada anterior. Página web en línea.

Consultado de: <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/pronostico-de-caudales-2019-2020-habra-11-menos-de-agua-que-la-temporada-anterior/>

Rezaei, A. y Gurdak, J. (2020). Large-scale climate variability controls on climate, vegetation coverage, lake and groundwater storage in the Lake Urmia watershed using SSA and wavelet analysis. *Science of the Total Environment* 724 (2020) 138273. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138273>

Rivera, J. Araneo, D. Penalba, O. y Villalba, R. (2017). Regional aspects of streamflow droughts in the Andean rivers of Patagonia, Argentina. Links with large-scale climatic oscillations. *Hydrology Research*. Doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2017.207>

Rivera, J. Araneo, D. y Penalba, O. (2014). Climatología de sequías hidrológicas en los ríos andinos de Argentina. XXVII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, San Juan, Argentina, 10-14 de noviembre de 2014. ISBN: 978-987-33-5605-6.

Romero, G. Goncalvez-Souza, T. Roslin, T. Marquis, R. Marino, N. Novotny, V. Cornelissen, T. et al., (2022). Climate variability and aridity modulate the role of leaf shelters for arthropods: A global experiment. *Global Change Biology*. Volume 28, Issue 11 p. 3694-3710. Doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.16150>

Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación, SIPHN. (2019). Sistema Nacional de Información Hídrica. Ministerio de Obras Públicas. República Argentina. Consultado de: <https://snih.hidricosargentina.gob.ar/Filtros.aspx>

Seneviratne, S. Zhang, X. Adnan, M. Badi, W. Dereczynski, C. Di Luca, A. Ghosh, S. Iskandar, I. Kossin, J. Lewis, S. Otto, F. Pinto, I. Satoh, M. Vicente-Serrano, S. Wehner, M. y Zhou. B. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Consultado de: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_11.pdf

Sistema Argentino de Información Jurídica, SAIJ. (2011). Declara la emergencia hídrica en la provincia de Mendoza. Ley 8.318. Mendoza, 28 de Junio de 2011. Boletín Oficial, 20 de Julio de 2011. Página web en línea. Consultado de: <http://www.saij.gob.ar/8318-local-mendoza-declara-emergencia-hidrica-provincia-mendoza-lpm0008318-2011-06-28/123456789-0abc-defg-813-8000mvoorpyel>

Timmermann, A. An, S. Kug, J. Jin, F. Cai, W. Capotondi, A. y Stein, K. (2018), El Niño–southern oscillation complexity. *Nature*. 559(7715), 535-545.

Wagena, M. Collick, A. Ross, A. Najjar, R. Rau, B. Sommerlot, A. Fuka, D. Kleinman, P. y Easton, Z. (2018). Impact of climate change and climate anomalies on hydrologic and biogeochemical processes in an agricultural

catchment of the Chesapeake Bay watershed, USA. *Science of The Total Environment*. Volumes 637–638. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.116>

Wharton, S. y Falk, M. (2016). Climate indices strongly influence old-growth forest carbon exchange. *Environ. Res. Lett.* 11 (2016) 044016. Doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/044016>

Xu, Y. Shen, Z. Zhang, J. Zang, R. y Jiang, Y. (2021). The Effects of Multi-Scale Climate Variability on Biodiversity Patterns of Chinese Evergreen Broad-Leaved Woody Plants: Growth Form Matters. *Front. Ecol. Evol.* 8:540948. Doi: <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.540948>

Zotelo, C. (2011). Variabilidad climática y ciclos naturales. Anales de la ANAV-2011. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria (ANAV). Consultado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/27824/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Capítulo V

CAUDALES AMBIENTALES

INTRODUCCIÓN

Los caudales ambientales representan aquella porción mínima de agua que la naturaleza requiere para subsistir sin ningún detrimento de su condición original (Arthington et al., 2018). En regiones con abundantes cantidades de agua (superficial, subsuperficial o subterránea), los conflictos entre el recurso hídrico disponible para usos consuntivos y usos ecológicos pueden resultar mínimos, pudiendo los ecosistemas continuar sin mayores alteraciones en sus funciones bióticas y abióticas. Esta situación no es la misma para localidades con regímenes climáticos áridos o con condiciones de disponibilidades hídricas disminuidas, cuya biota siempre se encuentra al margen de umbrales críticos para su supervivencia. Si a este panorama se le agrega la presión humana por consumo de agua (para uso doméstico, industrial o agrícola) y la variabilidad climática natural, el caudal ambiental puede situarse, ocasional o permanentemente, por debajo de su límite natural, repercutiendo negativamente en la salud de los ecosistemas y en la capacidad de seguir suministrando sus servicios ecosistémicos (Lozano et al., 2011; Arthington et al., 2018).

El consenso actual y general sobre los caudales ambientales los proporciona la Declaración de Brisbane y la Agenda de Acción Global sobre los Caudales Ambientales de 2018, los cuales, de acuerdo con Arthington et al. (2018), *“describen la cantidad, duración y calidad de los flujos de agua dulce y los niveles necesarios para sostener los ecosistemas acuáticos, que, a su vez, mantienen las culturas humanas, economías, estilos de vida sustentable y bienestar”*. Esta definición enfatiza no sólo la importancia de los caudales ambientales, sino también la vinculación que existe frente a variables humanas, como la calidad de vida, la economía y la cultura.

Asimismo, en la misma declaración se expresa que el objetivo del mantenimiento de los caudales ambientales radica en *“proteger y restaurar los valores sociales asociados a la salud, resiliencia, biodiversidad acuática de ecosistemas y los vitales servicios ecológicos, económicos, modos de vida sustentables y bienestar que éstos proveen a las personas de todas las culturas”*.

De este modo, la declaración de Brisbane (Arthington et al., 2018) se posiciona como un llamado urgente para la acción, protección y restauración de los caudales ambientales, de acuerdo con sus principales objetivos específicos:

1. Los caudales ambientales son esenciales para proteger y restaurar la biodiversidad, ecosistemas acuáticos y los servicios ecosistémicos que proveen a las sociedades.

2. Los caudales ambientales son críticos para proteger y salvaguardar la cultura mundial y los patrimonios naturales.
3. Los caudales ambientales han sido comprometidos y hoy muchos sistemas acuáticos alrededor del mundo están en riesgo.
4. La implementación de caudales ambientales requiere un conjunto complementario de políticas legislativas, regulatorias, financieras, científicas y culturales para asegurar su entrega efectiva y beneficios posteriores.
5. El conocimiento local y el manejo cultural de manejo del agua puede fortalecer el planeamiento de los caudales ambientales, así como su sustentabilidad en el tiempo.
6. El cambio climático incrementa el riesgo de degradación de ecosistemas acuáticos, intensificando la urgencia de acción para la implementación de los caudales ambientales.

Dadas las escasas precipitaciones del centro-oeste argentino, como se describió en los Capítulos III y IV, el abastecimiento hídrico agrícola y urbano proviene casi en su totalidad de las escorrentías andinas, cuyas aguas fluyen principalmente desde los deshielos glaciares y níveos de la alta montaña.

Como consecuencia de la elevada demanda hídrica en las cuencas (Mendoza, San Juan y Tunuyán, principalmente) que drenan a la zona de estudio (ver Capítulo VII), los ecosistemas de humedales de las zonas bajas de Cuyo (oasis del desierto) han experimentado procesos de desecación desde mediados del siglo XX. Lo anterior representa una pérdida de patrimonio natural invaluable, lo cual también implica un detrimento para la cultura local, asociada a los pueblos de ascendencia Huarpe y vinculados estrechamente a la zona de los humedales o bañados.

Dada la importancia del vínculo de los humedales con la región, repartida entre las tres provincias argentinas mencionadas, el objetivo principal se centra en determinar los caudales ambientales que deben fluir al humedal para restaurar y mantener las condiciones ecológicas y sociales relacionadas. El método de trabajo se orientó hacia el desarrollo del cálculo y análisis de caudales ambientales por medio de metodologías hidrológicas (p. ej., utilizando registros históricos de caudal).

CONTEXTO HISTÓRICO Y CONCEPTUAL

Para abordar la problemática del uso irracional de los recursos hídricos y el deterioro de los ecosistemas acuáticos, se utilizan los caudales ambientales como herramienta de la gestión integrada de los mismos (Dyson et al., 2003). Actualmente, se reconocen los caudales ambientales como esenciales para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, lo que ha sido mundialmente reconocido a través de la Declaración de Brisbane, realizada en Australia en 2007 y su modificación en el año 2018 (Arthington et al., 2018). La aplicación de

caudales ambientales requiere de un involucramiento social y un marco institucional y normativo, así como de políticas claras y efectivas (UNESCO, 2014). Tharme (2003) explica que el reconocimiento en las alteraciones hidrológicas de los ríos y cuerpos de agua a escala global, resultante en la degradación del ambiente, da paso a una ciencia relacionada al estudio de los caudales ambientales, término relacionado a la cantidad y calidad de agua requerida para la conservación del ecosistema y que mejor imite el régimen de caudales naturales (CHD, 2007).

Jurídicamente para la Argentina y en el marco del Seminario Internacional de Cambio Climático, Política Fiscal Ambiental y Caudales Ambientales (COHIFE, 2015) se estableció el significado del Artículo 1° de la Ley 26.688 del Régimen de Gestión Ambiental de Aguas, insistiendo en que el caudal ambiental “*es aquel concertado o regulado en una clausura a los fines de garantizar la existencia del río como tal*”. Por su parte, la Asociación de Inspecciones de Cauces (ASIC, s/f) establece que en la legislación provincial concerniente a las aguas para Mendoza (donde se localiza parte de la cuenca), no se consideran tópicos tales como los servicios ecológicos, las necesidades de conservación de los ecosistemas (caudales ecológicos) y principios que satisfagan los requerimientos de las transformaciones estratégicas del siglo XXI.

Dada la importancia en la determinación y consideración de los caudales ambientales en el manejo de los recursos hídricos de las diferentes regiones, es vital establecer criterios de planificación y gestión integral del recurso hídrico y en especial de los caudales ambientales a través de una serie de metodologías creadas según las características hidrológicas de cada región (Lozano et al., 2011; Del Pilar y Corradine, 2014).

“La ausencia de estudios de caudales ambientales pone en verdadero riesgo la existencia de ecosistemas, personas y economías” (IUCN, 2003), situación que puede ser aún más severa si una zona, como el centro – oeste argentino, posee un clima árido, lo cual la hace propensa a recurrentes y severas sequías que pueden poner en riesgo el equilibrio hídrico y ecológico de los humedales y la región (Sosa et al., 1999).

La convención Ramsar, de la cual Argentina es parte con más de 20 sitios, insta a las partes contratantes a impedir las progresivas degradaciones de los humedales (Ramsar, 2016). De esta forma, en las últimas Conferencias de Partes Contratantes de Ramsar (COP 10, 11, 12 y 13) se reafirmó el compromiso de evitar los impactos negativos en las características ecológicas de los sitios protegidos, como primer paso de las estrategias para impedir la pérdida de estos (Ramsar, 2015a,b,c,d). Por consiguiente y mediante cuatro objetivos estratégicos en su Plan Estratégico de Ramsar para 2016-2024, esta organización insta a: (i) hacer frente a los factores que impulsan la pérdida y degradación de los humedales, (ii) llevar a cabo una conservación y un manejo eficaz de la red de sitios Ramsar, (iii) realizar un uso racional de todos los humedales y (iv) mejorar la aplicación de los objetivos en función de las necesidades de cada país (Ramsar, 2016).

Dentro de las metodologías y herramientas que la modernidad desarrolla en la actualidad se encuentran los sistemas de información geográficos (SIG). Representan una herramienta valiosa para las aplicaciones de inventario, evaluación y monitoreo de humedales, así como también de los eventos climáticos que potencian su degradación (como las sequías) (OMM, 2006; Lowry 2007).

Dada la gran biodiversidad alojada en el humedal de estudio, Sosa, et al. (1999) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2017) detallan que la zona cuenta con una rica diversidad biológica asociada al humedal y una comunidad local humana que alcanza a los 2.000 habitantes, cuyas costumbres y tradiciones se vinculan históricamente a las lagunas. En el mismo orden de ideas, Corona y González (2014) ejemplifican por medio de imágenes satelitales la evolución del humedal de Guanacache, pudiendo evidenciar desde 1989 y hasta el 2013, el deterioro del sitio Ramsar principalmente por causas antrópicas, comparando esta situación con el conocido desastre ambiental del mar de Aral (Asia). Si bien los diferentes investigadores evidencian los graves problemas ambientales de este sitio Ramsar y sus consecuencias ecológicas y sociales, es notable que ninguno hace mención directa en sus hallazgos al estudio detallado del caudal ambiental como eslabón principal para el entendimiento de esta situación (Minervini et al., 2012; Sosa, 2012; Candia et al., 2015).

METODOLOGÍA

El esquema de trabajo se basa en la descripción y análisis de parámetros y características hidrológicas correspondientes a las estaciones hidrométricas localizadas en el área de estudio (Tabla 5.1; Figura 5.1). El objetivo radica en analizar las características propias de cada estación aguas arriba (p. ej., MEG, SJ1 y TVU), versus las estaciones aguas abajo o dentro del sitio Ramsar (p. ej., ELC y DST). En el caso de SJ4, el análisis se refiere a su vinculación con la represa Los Caracoles, situada aguas arriba de la misma (Figura 5.1).

Cabe destacar que los métodos de trabajo no incluyen características biológicas (métodos holísticos) e hidráulicas, por lo que solo consideran aspectos relacionados al régimen hidrológico. La aplicación de estas metodologías representa el primer paso en el establecimiento de caudales ambientales asociados con ecosistemas, para lo que serían necesarias las demandas hídricas de diversas especies animales y vegetales locales, así como también los parámetros hidráulicos del sistema fluvial involucrado.

Tabla 5. 1. Estaciones hidrométricas consideradas.

Código estación	Nombre	Período	Estación utilizada como
MEG	Mendoza – Guido	1956 – 2018	Fuente de datos
SJ1	San Juan – km. 101	1971 – 2018	Fuente de datos
TVU	Tunuyán – Valle de Uco	1944 – 2018	Fuente de datos
SJ4	San Juan – km. 47,3	1951 – 2018	Contraste*
ELC	San Juan – El Encón	1991 – 2018	Contraste*
DST	Desaguadero - Salto de la Tosca	2017 – 2018	Contraste*

*Contraste aplicado para algunas medidas específicas.

La longitud de registros no es la misma para las estaciones estudiadas, dado que se priorizó el análisis con el mayor número de datos disponibles. Lo anterior se justifica ya que el estudio se centra en el análisis del aporte de caudales de los ríos Mendoza, San Juan y Tunuyán al sitio Ramsar. De esta forma, no fue necesario el establecimiento de un período común entre estaciones, dada la ausencia de comparación entre ellas.

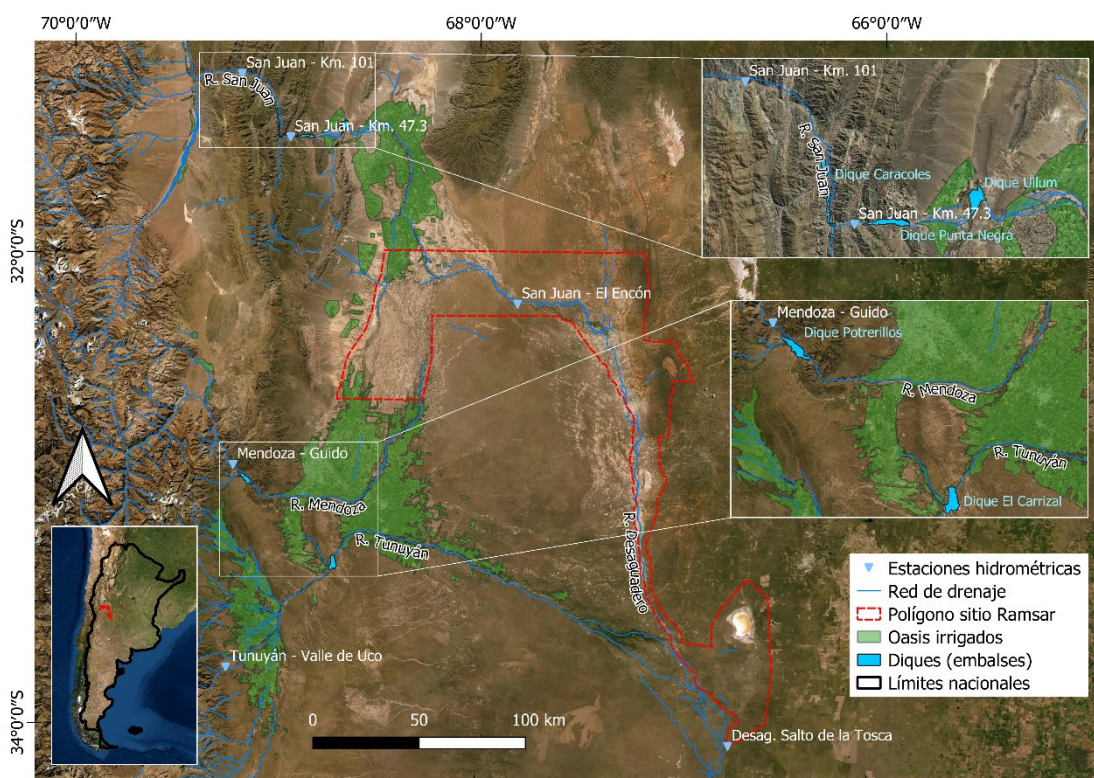


Figura 5. 1. Área de estudio y estaciones hidrométricas utilizadas. Las estaciones ubicadas al oeste del mapa: Mendoza-Guido (MEG), Tunuyán-Valle de Uco (TVU) y San Juan km. 101 (SJ1) fueron utilizadas posteriormente en el análisis de comparación de caudal ambiental.

Inicialmente, se utilizó la metodología propuesta por The Nature Conservancy, (2011) denominada Indicadores de Alteración Hidrológica “IHA” (*Indicators of Hydrologic Alteration*). Esta metodología comprende dos bloques: parámetros IHA y parámetros EFC o Componentes del Caudal Ecológico (*Environmental Flow Components*). Cabe destacar que varias metodologías (como IHA) denominan sus resultados como caudales ecológicos. Sin embargo, de acuerdo con la última convención de Brisbane (Arthington et al., 2018), el término se denomina “caudales ambientales”, dado su carácter integral, traspasando las fronteras de la ecología para incluir a las sociedades involucradas.

Los parámetros IHA describen los regímenes hidrológicos de las estaciones analizadas, en función de sus diversas influencias sobre los ecosistemas. Por otra parte, los parámetros EFC definen los componentes del caudal ecológico, de acuerdo con sus propiedades sobre los ecosistemas afectados. A continuación y de acuerdo con The Nature Conservancy (2011), se describen los parámetros aplicados.

La definición de los siguientes parámetros y métodos responde a su aplicación posterior a las series de datos de caudales disponibles (Tabla 5.1), con fines de comparación y caracterización respecto al régimen hídrico y caudales ambientales.

Parámetros IHA

Comprenden 33 parámetros hidrológicos de acuerdo con sus diversas influencias sobre los ecosistemas.

Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales

Parámetros hidrológicos: medias/medianas para cada mes calendario.
Influencias sobre los ecosistemas: disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos, disponibilidad de humedad del suelo para las plantas, disponibilidad de agua para animales terrestres, disponibilidad de alimentos/cobertura para mamíferos lanudos, confiabilidad del abastecimiento de agua para animales terrestres, acceso de los depredadores a los sitios de anidación, influencia sobre la temperatura del agua, niveles de oxígeno y fotosíntesis en la columna de agua.

Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas anuales

Parámetros hidrológicos: mínimos y máximos anuales de 1, 3, 7, 30, 90 días para percentiles de 10, 25, 50, 75 y 90 % e índice de flujo base BFI (*Base Flow Index*) (caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual).
Influencias sobre los ecosistemas: equilibrio de organismos competitivos, creación de sitios para la colonización de plantas, estructuración de los ecosistemas acuáticos, estructuración de la morfología del canal del río y condiciones físicas del hábitat, estrés hídrico en plantas, deshidratación animal, estrés anaeróbico en plantas, volumen de intercambio de

nutrientes entre ríos y planicies de inundación, duración de las condiciones de presión (p. ej., bajos niveles de O₂, concentración de químicos en ambientes acuáticos), distribución de comunidades de plantas en lagos, estanques y planicies de inundación, duración de los caudales altos para la eliminación de residuos y remoción de sedimentos.

El Índice de Caudal Base (BFI, *Base Flow Index*) se define como la relación entre el flujo base medio a largo plazo y el flujo total. El BFI varía generalmente entre 0,20 y 0,96 indicando la posibilidad que el porcentaje obtenido del caudal a largo plazo se origine en la descarga de agua subterránea y otras fuentes (Singh et al., 2018). El cálculo se obtiene mediante el cociente del caudal mínimo en 7 días anual dividido entre el caudal medio anual (EBISA, 2017).

Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales

Parámetros hidrológicos: fecha juliana de caudales máximos y mínimos anuales de 1 día para percentiles 10, 25, 50, 75 y 90 %.

Influencias sobre los ecosistemas: compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos, predictibilidad/evitabilidad del estrés en los organismos, acceso a hábitats especiales durante la reproducción o para evitar la depredación, indicios para el desove de los peces migratorios, evolución de las estrategias de los ciclos biológicos.

Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos

Los pulsos de crecidas (altos o bajos), representan el aumento del nivel de un cuerpo de agua (p. ej., un río), el cual vuelve a su condición de flujo o volumen original luego del evento (WWF, 2018). De esta forma, incluso durante períodos de estiaje, algunos cuerpos de agua pueden experimentar pulsos de bajo caudal o volumen, ocasionalmente debidos a una lluvia de determinada magnitud. Su fluctuación en magnitud y variabilidad temporal es crucial para el mantenimiento de los ecosistemas dependientes (p. ej., humedales).

Parámetros hidrológicos: cantidad de pulsos bajos y altos en cada año hidrológico.

Influencias sobre los ecosistemas: frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico y de la humedad del suelo en las plantas, disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos, intercambios de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación, disponibilidad de minerales del suelo, acceso a sitios de alimentación y hábitat de aves acuáticas, influencia en el transporte de cargas de fondo, textura de sedimentos y duración de perturbaciones del sustrato.

Parámetros de EFC

Comprenden 34 parámetros hidrológicos de acuerdo con sus diversas influencias en los ecosistemas (The Nature Conservancy, 2011), dentro de los cuales destacan:

Caudales extremadamente bajos

Parámetros hidrológicos: magnitud, duración, frecuencia y día de ocurrencia de los caudales extremadamente bajos.

Influencias en los ecosistemas: permiten el reclutamiento de ciertas especies de plantas en las planicies de inundación, eliminan especies invasoras introducidas de las comunidades acuáticas y riparias, concentran las presas en áreas limitadas para beneficiar a los depredadores

Caudales bajos

Parámetros hidrológicos: magnitud, duración, frecuencia y día de ocurrencia de los caudales bajos.

Influencias en los ecosistemas: proporcionan hábitat adecuado para los organismos acuáticos, mantienen temperaturas del agua, oxígeno disuelto y química del agua apropiados, mantienen el nivel freático en las planicies de inundación y la humedad del suelo para las plantas, proporcionan agua potable para los animales terrestres, mantienen los huevos de peces y anfibios en suspensión, permiten a los peces moverse a áreas de alimentación y desove, apoyan organismos hiporreicos (que viven en sedimentos saturados).

Pulsos de caudal alto

Parámetros hidrológicos: magnitud, duración, frecuencia y día de ocurrencia de los caudales altos.

Influencias en los ecosistemas: modelan las características físicas del cauce del río, incluidos remansos y rápidos, determinan el tamaño de los sustratos del lecho de las corrientes, impiden invasión de vegetación riparia en el cauce, restauran las condiciones de calidad normal del agua luego de episodios de caudales bajos prolongados, airean huevos en gravillas de desove, mantienen condiciones adecuadas de salinidad en estuarios y sitios de desembocadura.

Pequeñas inundaciones

Parámetros hidrológicos: magnitud, duración, frecuencia y día de ocurrencia de los pulsos de pequeñas inundaciones.

Influencias en los ecosistemas: proporcionan indicios de migración y desove a los peces, provocan una nueva fase en el ciclo biológico (p. ej., insectos) y permiten que los peces desoven en las planicies de inundación. Asimismo, proporcionan nuevas oportunidades de alimentación a los peces y aves acuáticas, recargan el nivel freático de las planicies de inundación y mantienen la diversidad de los tipos de bosque en las planicies de inundación mediante inundaciones prolongadas. Finalmente, depositan nutrientes en las planicies de

inundación, representando un hecho de suma importancia para la fertilización de los suelos.

Grandes inundaciones

Parámetros hidrológicos: magnitud, duración, frecuencia y día de ocurrencia de las grandes inundaciones.

Influencias en los ecosistemas: mantienen el balance de especies en las comunidades acuáticas y riparias, crean sitios para el reclutamiento de plantas colonizadoras, dan forma a hábitats físicos de las planicies de inundación, depositan gravas y rocas en áreas de desove, arrastran materia orgánica al cauce, eliminan especies invasoras en franjas acuáticas y riparias, esparcen semillas y frutas de plantas riparias, impulsan movimientos laterales del cauce del río y proporcionan a las plántulas acceso prolongado a la humedad del suelo.

Adicional a los parámetros IHA, los caudales fueron analizados de acuerdo con el contraste de la curva de duración de caudales diarios, así como también mediante indicadores hidrológicos del régimen fluvial, como: caudal anual medio y mediano, duración de caudales bajos ($Q \leq Q_{75}$) y altos ($Q > Q_{25}$) por año, índices de predictibilidad, constancia y contingencia de Colwell y frecuencia absoluta anual promedio de $Q > 3 \cdot Q_{50}$ (The Nature Conservancy, 2011).

Definiciones

Índice de predictibilidad, constancia y contingencia de Colwell. Este índice de Colwell (1974, citado por EBISA, 2017) expresa que se refiere a una medida de variabilidad entre años, la cual presenta los componentes de constancia y contingencia. La constancia se refiere a la variabilidad de un mismo evento en los diferentes años, mientras que la contingencia expresa la periodicidad de un evento en un período concreto del año. El análisis se realiza sobre la variable de predictibilidad (P), tomando como base el cociente de los índices de constancia (C) y contingencia (M) sobre el primero (p. ej., C/P; M/P).

Por otra parte y adicional a los parámetros EFC, se aplicaron diversas metodologías para determinar los caudales ambientales de acuerdo con procedimientos de origen hidrológico. Mediante estos métodos se explorarán las diversas opciones a considerar dentro del objetivo principal de aplicación de caudales ambientales, el cual es seleccionar aquel o aquellos que mejor emulen los ciclos fluviales naturales.

Caudal ambiental como fracción de una medida de tendencia central

La Dirección General de Obras Hidráulicas de España, Ley de Aguas de Francia, Ley de Aguas de Colombia y de Costa Rica definen el caudal ambiental como el 10 % del caudal medio anual (Huguenin, 2017). El método del Ministerio del

Medio Ambiente de la República de Chile expresa que el caudal ambiental es aquel “*caudal equivalente al veinte por ciento del caudal medio mensual de la respectiva fuente superficial con el límite máximo del veinte por ciento del caudal medio anual establecida en el artículo 129 bis 1 del Código de Aguas*” (Huguenin, 2017).

Caudal ambiental ABF (*Aquatic Base Flow*) está definido como la mediana de los caudales medios mensuales para el mes más seco (Consuegra, 2013).

Método de Tennant o Montana (1976): establece los requerimientos (Tabla 5.2) de caudal con base en el porcentaje del caudal medio que mantendría los atributos biológicos de un río. Es una metodología ampliamente usada y recomendada para ríos sin obras hidráulicas que alteren sus regímenes hídricos (p. ej., represas) (Arthington y Zalucki, 1998, citado por Pantoja, 2017). Dada esta recomendación y aún con presencia de represas en el área, se decidió igualmente observar sus resultados mediante aplicación previa.

Tabla 5. 2. Requerimientos de caudales de acuerdo con el método de Tennant (Modificado de Arthington y Zalucki, 1998).

Tipos cualitativos de caudales	Caudales sugeridos (% del Q_{med})
Aceptable	10 – 30
Bueno	20 – 40
Excelente	30 – 50
Excepcional	40 – 60

Cabe destacar que los porcentajes de la Tabla 5.2 fueron sugeridos de acuerdo con registros de EE. UU, por lo que podrían ser modificados a condiciones locales en caso de ser necesario.

Caudales ambientales asociados a una probabilidad

Método 7Q10: Pantoja (2017) señala que este método estima el caudal ambiental a partir del caudal mínimo promedio de siete días y período de retorno de 10 años. De esta forma, proporciona el valor de un caudal mínimo estadístico, el cual será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de 7 días y en promedio cada 10 años.

Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales

Método de Matthey: caudal superado en 300 días del año (Q_{300}), obtenido a partir de la curva de duración de caudales (Lozano et al., 2011).

Método de Hoppe: establece una relación entre la curva de duración de caudales y las condiciones más favorables para ecosistemas acuáticos (Tabla 5.3).

Tabla 5. 3. Requerimientos de caudales de acuerdo con el método de Hoppe (Díez, 2000).

Tipo de caudales	Q de excedencia	Q _{días} de excedencia
Limpieza	Q ₁₇	69,99
Mantenimiento	Q ₄₀	37,11
Mínimo de Hábitat	Q ₈₀	19,48

El Programa de recursos de las grandes llanuras septentrionales (NGPRP, *Northern Great Plains Resources Program*) define un caudal ambiental determinado a partir de la curva de duración de caudales medios diarios para el mes analizado, considerando percentiles como Q₉₀ para meses secos y Q₅₀ para meses húmedos (Consuegra, 2013, citado por Pantoja, 2017).

Q₉₅ – Método colombiano: caudal que hace referencia al 95 % de probabilidad de que un caudal sea igualado o superado en una escala mensual (Lozano et al., 2011).

Método del caudal de mantenimiento: QBM por sus siglas en inglés, considera la variabilidad natural del régimen hídrico, el cual consiste en establecer un régimen de caudales a partir de un caudal básico obtenido a partir de series de caudales medios diarios tratados con medias móviles de intervalos crecientes (SEIA, 2016). El procedimiento puede seguirse detalladamente de acuerdo con la metodología propuesta por Palau (1994).

En resumen, para este método se establecen las medias móviles anuales mínimas (i) para todos los años (con n en rango 1 – 100). De la matriz generada, se obtienen incrementos $(i - [i - 1]) / (i - 1)$, de cuyo valor mayor respecto a i se obtiene el caudal base Q_b. Posteriormente, se aplica la ecuación [5.1]:

$$QBM = Q_b \sqrt{Q_{mes} / Q_{min}} \quad [5.1]$$

Donde, QBM: caudal de mantenimiento para el mes i; Q_b: caudal base; Q_{mes}: caudal medio del mes i; Q_{min}: caudal mínimo del año en curso. Finalmente, el caudal de mantenimiento medio de cada mes, será el promedio de cada valor medio mensual en la serie temporal analizada.

Métodos que establecen un valor de caudal ambiental para cada mes del año

El Servicio de Pesca y Vida de los Estados Unidos: establece el caudal ambiental como el promedio mensual del mes más seco (Huguenin, 2017).

Método Utah – mínimo del Q mensual: Lozano et al. (2011) establecen que este método hace uso de los mínimos mensuales históricos como caudales ecológicos.

Propuesta de modificación de la Ley 25688 de la República Argentina (HCDN, 2017). En el proyecto de Ley (a la fecha aún no aprobado), se propone como anexo al artículo 7:

“Artículo 7°. - La determinación del caudal ecológico se realizará a través del estudio de los datos históricos de caudales, contemplando la variabilidad estacional en los valores de escurrimiento. Así, para cada mes del año se propone considerar el caudal mínimo ecológico al valor equivalente al 20 % del caudal medio mensual histórico”.

De esta manera y dada la poca exactitud de la ley vigente, la cual delega el manejo de los recursos hídricos superficiales a autoridades competentes, la propuesta establece, además, en sus artículos 5 y 6:

“Artículo 5°. - Los caudales ecológicos se fijarán en los planes de gestión de los recursos hídricos para cada cuenca. Para su establecimiento, se realizarán estudios específicos para cada tramo del río según la regulación existente”.

“Artículo 6°. - Las metodologías para la determinación del caudal ecológico serán establecidas por la autoridad de aplicación, con la participación de las autoridades de cuenca si existiesen y de los organismos competentes a nivel provincial y/o municipal, según la normativa vigente en cada jurisdicción”.

Si bien la propuesta de ley no ha sido aprobada, se toma como referencia metodológica para evaluar su impacto dentro del análisis.

Alteración de caudales producidos por el impacto de una represa

Con el objetivo de analizar los efectos de amortiguación de una represa sobre los caudales ambientales, la comparación se realizó con base en los registros de la estación SJ4 (aguas abajo de la represa Los Caracoles, Figura 5.1). El período de referencia del impacto se definió en función de la fecha de inauguración y llenado de la represa (10 de octubre de 2008).

El análisis fue realizado a través del software IHA (The Nature Conservancy, (2011), a través del cual se analizaron las diferencias de la aplicación de los componentes del caudal ambiental (EFC) entre SJ1 y SJ4, con el fin de determinar el efecto regulador de la represa Los Caracoles. Cabe destacar que SJ4 es la única estación de comparación disponible aguas abajo de una represa en la zona, por lo que sus resultados se infieren en forma general hacia el resto de las represas que embalsan a los ríos afluentes del sitio Ramsar (Mendoza y Tunuyán).

RESULTADOS

La aplicación de los diversos métodos presentados en la metodología a las series temporales de las estaciones MEG, TVU y SJ1 (Figura 5.1) permitió establecer las diferentes posibilidades de utilización de caudales ambientales. Cabe destacar que dichos caudales representan una medida probable, por lo que su potencial implementación dependerá de los objetivos y realidades ambientales particulares de la región. Los distintos caudales responden a los requerimientos (según cada método) de los correspondientes sitios de aforo.

Es posible que los objetivos ambientales de una región no se encuentren contiguos a las estaciones hidrométricas, sino varios kilómetros distanciados. La región de estudio Ramsar, se encuentra a 180 km en promedio aguas abajo de las estaciones hidrográficas. Esto implica que en dichos trayectos el agua se evapore, infiltre o se aproveche por los ecosistemas riparios. En todo caso, aunque es agua contabilizada aguas arriba que no llegaría a su zona objetivo (p. ej., sitio Ramsar), es una parte del recurso implícitamente considerado para los usos ambientales de los trayectos fluviales y por ende, parte del agua estimada dentro de las metodologías empleadas.

A continuación, se presentan los resultados de los diversos métodos utilizados. Se comienza con los parámetros IHA (Figuras 5.2 a 5.6), siguiendo con los parámetros EFC (Figuras 5.7 a 5.12), luego con curvas de duración de caudales e índices (Figuras 5.13 a 5.17). Luego se presentan los resultados de las diferentes metodologías para el cálculo de caudales ambientales (Figuras 5.18 a 5.29) y el análisis del impacto de la represa Los Caracoles sobre los caudales del río San Juan (Figuras 5.30 a 5.33).

Parámetros IHA - Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales

Los mayores caudales escurren desde el río San Juan (SJ1), con valores superiores al Mendoza (MEG), sobre todo en meses invernales (Figura 5.2). Los mayores caudales medianos son alcanzados en MEG durante enero, mientras que, en los promedios, SJ1 alcanza los 117 m³/s durante el mes de diciembre. El régimen hídrico de los ríos responde al ciclo hidrológico de ríos de montaña en el hemisferio sur, cuya fuente principal se da por ablación glaciar durante el verano. De esta forma, los caudales máximos se registran durante los meses estivales y los mínimos en los invernales.

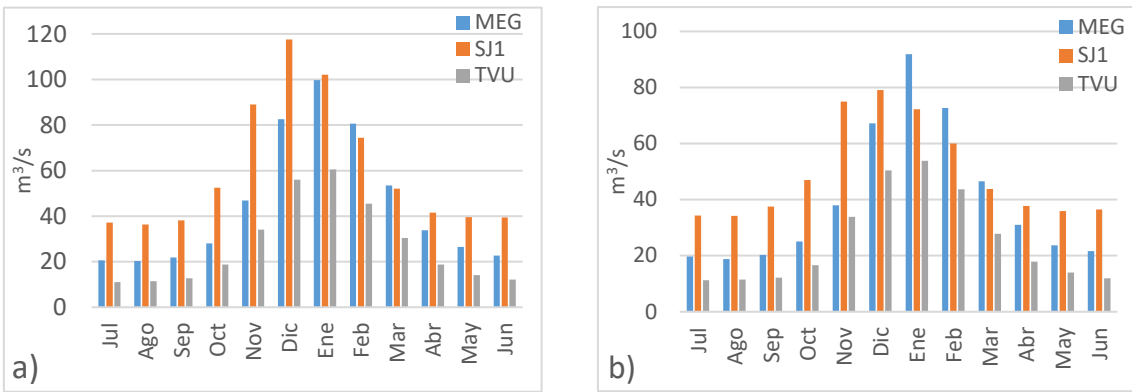


Figura 5. 2. Caudales medios (a) y medianas (b) para cada mes calendario en las estaciones MEG, SJ1 y TVU (Figura 5.1).

Basadas en esta estructura de escorrentías, las diversas metodologías de caudales ambientales estiman sus resultados, intentando así emular las demandas ambientales de los ecosistemas involucrados. Las sumatorias de las escorrentías que deberían fluir hacia la zona norte del sitio Ramsar (MEG + SJ1) y el total hacia el final del humedal (sumando TVU a los anteriores) se muestran en la Figura 5.3.

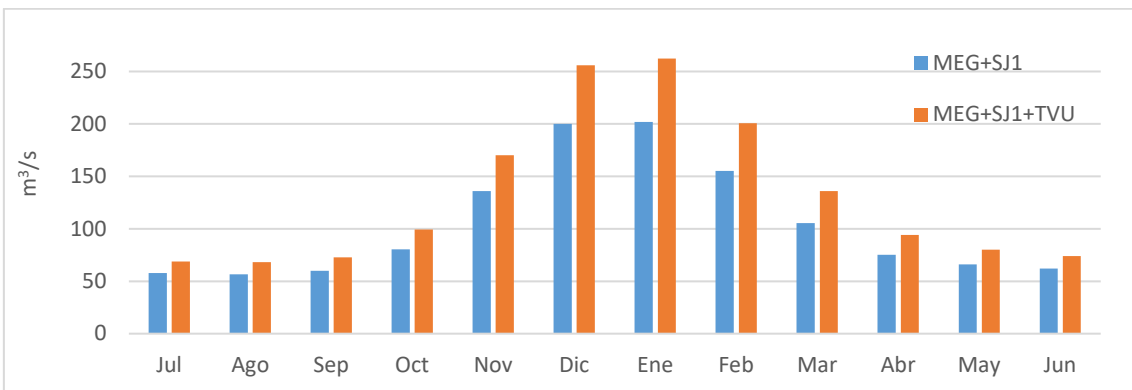


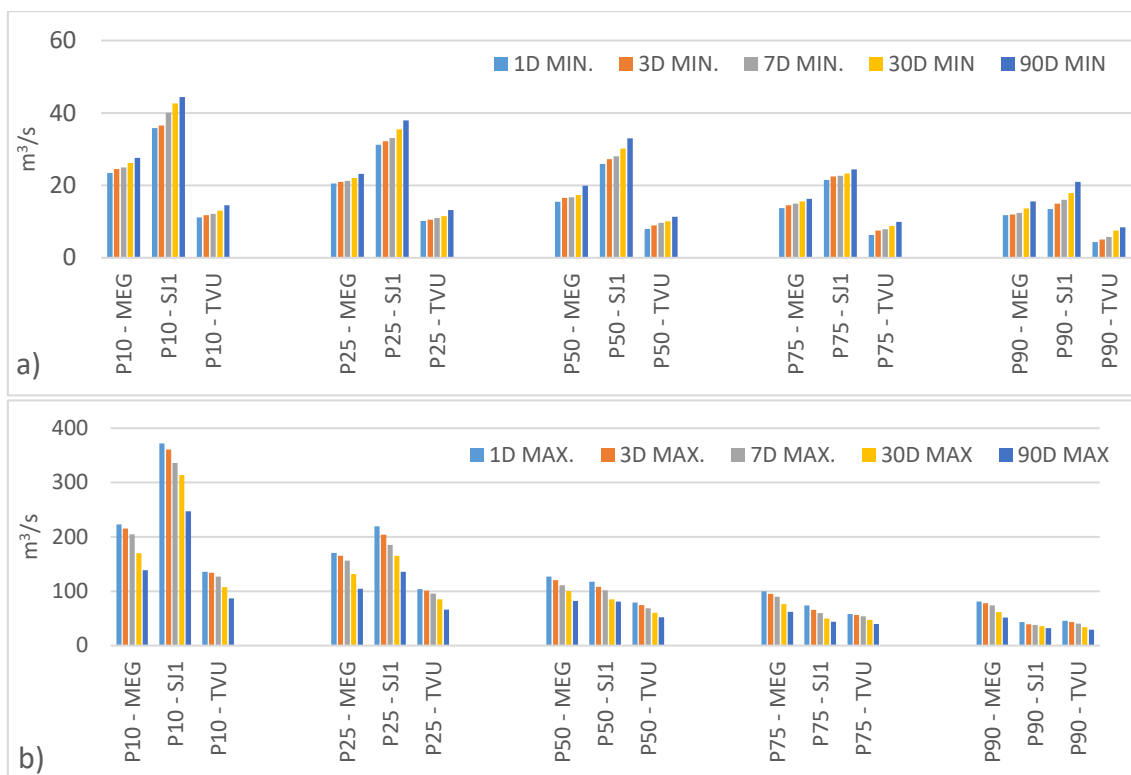
Figura 5. 3. Sumatoria de promedios escurridos entre MEG+SJ1 (zona norte del sitio Ramsar) y MEG+SJ1+TVU para la totalidad de este (Figura 5.1).

Dado que los tres ríos escurren hacia una misma zona (sitio Ramsar), dependiendo de su ubicación de afluencia (p. ej., zona norte), la sumatoria de los escurrimientos expresa el régimen natural del agua que fluye hacia dicho sitio y sin considerar pérdidas de escorrentía superficial por evaporación, infiltración o usos antrópicos. En este caso y en promedio, el rango de afluencia oscila entre los 50 y los 200-250 m³/s para meses de invierno y verano, respectivamente. De esta forma, se manifiesta la proporción media de agua afluente al sitio Ramsar, situación que se relaciona con la existencia pasada de antiguos bañados y lagunas encadenadas en la zona septentrional del mismo (Figura 5.1).

Parámetros IHA - Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales

Agrupados por estaciones y por cuantiles de ocurrencia para 1, 3, 7, 30 y 90 días, en la Figura 5.4 se muestran resultados de caudales mínimos y máximos, así como el índice de flujo base para los percentiles descriptos. La estación SJ1 presenta caudales mínimos (Figura 5.4a) entre aproximadamente 20 y 44 m³/s para P₉₀ y P₁₀, respectivamente, superando a MEG y TVU. De esta forma, se observa cómo existe un margen de escorrentía continuo en los ríos, cuyas sumatorias de afluencia al norte del sitio Ramsar (MEG+SJ1) alcanzarían los 25 m³/s. Esto sugiere que naturalmente, existen escorrentías que permitirían la subsistencia de ecosistemas en ambientes riparios y humedales bajos de acumulación de agua.

El rango de diferencia entre los percentiles 90 y 10 de los caudales máximos es mayor (Figura 5.4b). Entre estas estaciones, la mayor diferencia se observa para un P₁₀, con máximos en SJ1 de 371 m³/s para 1 día. Desde los percentiles 50 a 90, MEG se posiciona sobre SJ1 con los mayores valores. Los máximos de 1 día alcanzan los 81 m³/s en MEG. Esta diferencia (≈78 %) expresa la alternancia no regular de pulsos de crecidas en la región, necesarios para el mantenimiento de humedales aguas abajo.



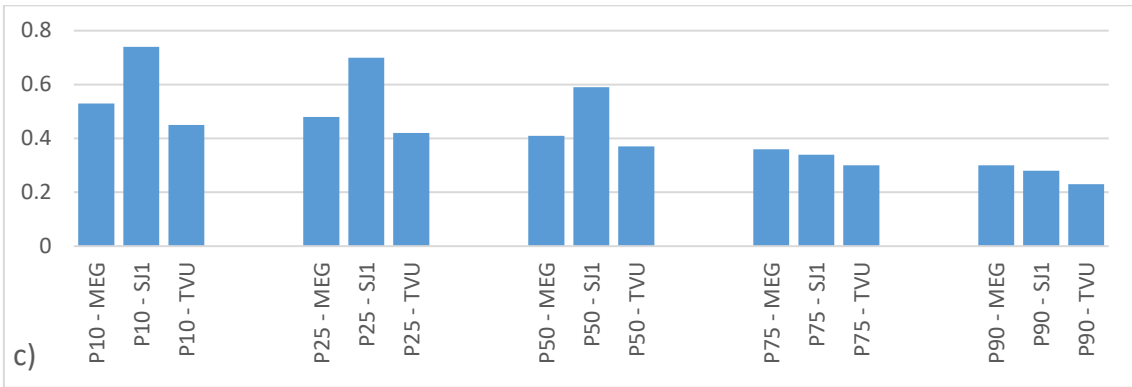


Figura 5. 4. Cuantiles mínimos (a) y máximos (b) anuales para 1, 3, 7, 30, 90 días. Índice de flujo base (caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual) (c).

Adicionalmente y relacionado al índice de flujo base (Figura 5.4c), los mayores aportes entre los cuantiles P₇₅ y P₉₀ provienen de MEG. Sin embargo, entre los cuantiles P₁₀, P₂₅ y P₅₀, el San Juan en SJ1 se diferencia del resto como el mayor aportante de flujo base al sistema.

Parámetros IHA – Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales



Figura 5. 5. Momento de ocurrencia (día juliano) de las condiciones hidrológicas extremas mínimas (a) y máximas (b) anuales.

Dentro de los extremos de caudales, en la Figura 5.5 se presentan los momentos de ocurrencia de dichos eventos para un año hidrológico medio. Para los

percentiles P_{10} al P_{50} el margen de ocurrencia de los caudales mínimos se ubica entre el día 180 y 260 (julio – mitad de septiembre), concordando con los días finales del invierno (Figura 5.5a). Para P_{75} a P_{90} , los mínimos pueden aparecer hasta un mes antes, sobresaliendo el caso de SJ1 con días julianos entre 73 y 103 respectivamente (mediados de marzo y abril).

Por su parte, los máximos se presentan en todas las estaciones y percentiles, en el rango entre los días 4 y 355, siendo esto entre finales de diciembre e inicios de enero. Lo anterior coincide con la ocurrencia de las mayores temperaturas en la región (verano), lo que indirectamente incide sobre la ablación glaciar y la aparición de tormentas estivales. Cabe resaltar la importancia ecológica de estos momentos de ocurrencia para escorrentías máximas y mínimas, los cuales influyen sobre los ciclos de vida y de aparición de potencial estrés hídrico para los organismos presentes, así como también su frecuencia, duración y magnitud (Figura 5.6).

Parámetros IHA - Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos

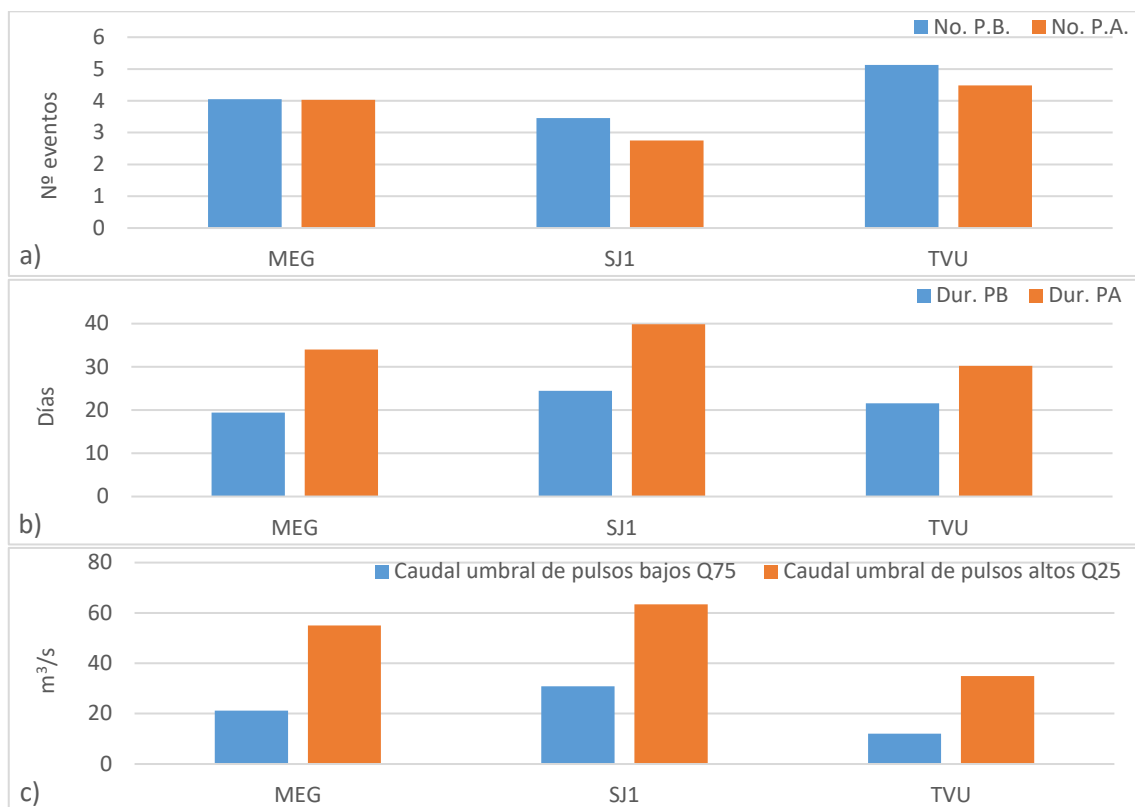


Figura 5. 6. Número de eventos (a), duración (b) y magnitud (c) promedio anual de pulsos altos y bajos para MEG, SJ1 y TVU.

El número de eventos promedio anuales que ocurrieron para los períodos analizados se expone en la Figura 5.6a. Por su parte, el rango de ocurrencia entre pulsos altos y bajos es homogéneo, variando entre 3 y 5. Cabe destacar que la mayoría de los pulsos altos ocurren durante el período estival, sumamente necesarios para mantener la frecuencia y magnitud de la dualidad de estrés

aeróbico-anaeróbico de ecosistemas riparios y de humedales. Adicionalmente, la alternancia de pulsos altos y bajos durante el año hidrológico es uno de los factores más importantes para mantener la salud de los ecosistemas aguas abajo del sitio de aforo. En este sentido, su duración media anual (Figura 5.6b) se sitúa cerca de 20 días para pulsos bajos y entre 30 y 40 días para pulsos altos. En este sentido, los pulsos altos presentan casi un 50 % más de duración que los bajos.

Las magnitudes de pulsos bajos oscilan entre 12 y 30 m³/s (Figura 5.6c). La sumatoria de estos pulsos para MEG y SJ1 se sitúa en 52 m³/s, lo cual indica el caudal promedio de pulsos bajos que debería fluir hacia el norte del sitio Ramsar. Lo anterior permitiría la afluencia permanente promedio de agua a la zona, alejando la potencial situación de caudales nulos, por lo que se infiere una actividad ecológica permanente durante la ocurrencia del ciclo hidrológico normal y sin alteraciones no naturales. Por su parte, los pulsos altos oscilan desde los 55 a los 63 m³/s para MEG y SJ1, respectivamente, dejando 35 m³/s para TVU. La frecuencia y magnitud natural de estos pulsos, sumado a su alternancia con los pulsos bajos, permitirían mantener la salud y estabilidad de los ecosistemas riparios, lacustres y de humedales aguas abajo.

Parámetros de los componentes del caudal ambiental (EFC)

La magnitud, duración, fecha de ocurrencia y frecuencia de los caudales extremadamente bajos, bajos, altos, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones se presentan en las Figuras 5.7 a 5.12, respectivamente. Para todas las figuras, el eje de las abscisas está determinado por el porcentaje de excedencia temporal anual.

Caudales extremadamente bajos

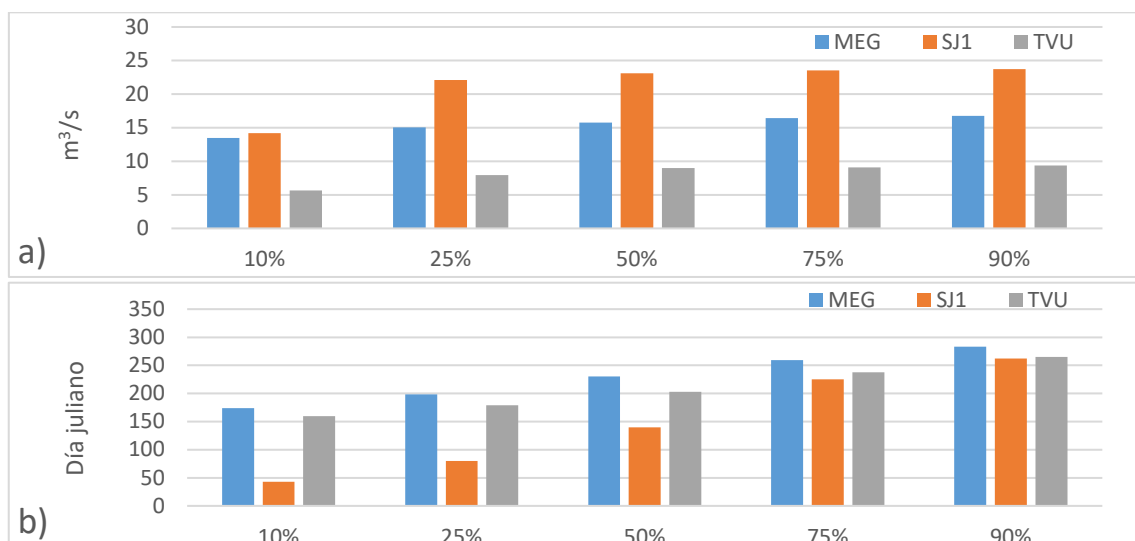


Figura 5. 7. Magnitud (a) y duración (b) de caudales extremadamente bajos para diferentes percentiles de ocurrencia.

Para percentiles superiores al 25 % del tiempo, los caudales extremadamente bajos de MEG, SJ1 y TVU superan los 5, 15 y 20 m³/s. Sus ocurrencias en el año se encuentran en torno a los meses invernales, con percentiles de 10 y 25 % de ocurrencia de SJ1 hacia enero y febrero.

Caudales bajos

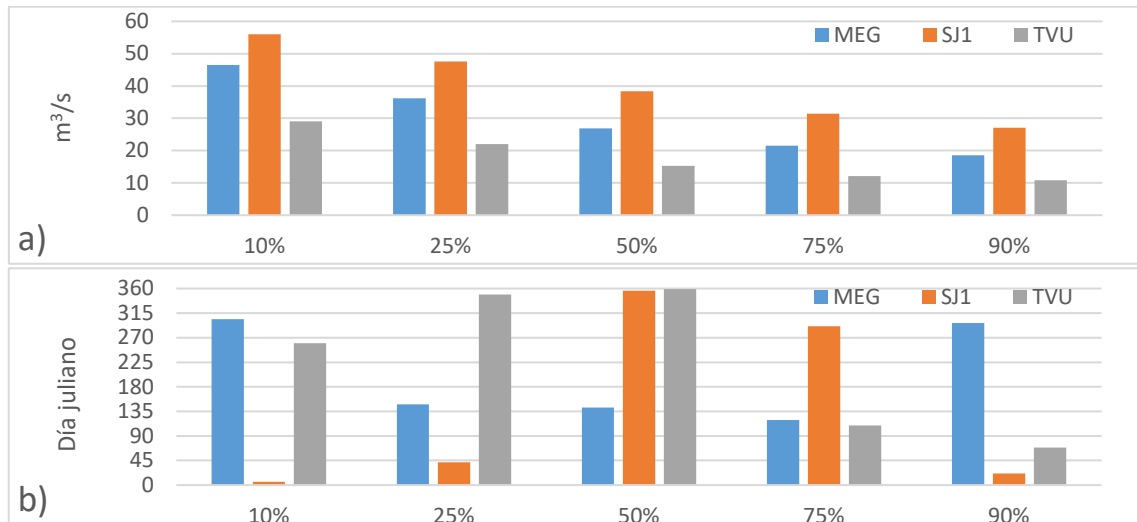


Figura 5. 8. Magnitud (a) y duración (b) de caudales bajos para diferentes percentiles de ocurrencia.

Las mayores magnitudes suceden en un 10 % del tiempo, oscilando entre 10 y 27 m³/s para MEG, SJ1 y TVU, respectivamente en un 90 %. En cuanto a la ocurrencia de dichos caudales, los márgenes generales se encuentran en la fase hacia las crecidas y estiajes (primavera y otoño, respectivamente).

Caudales altos

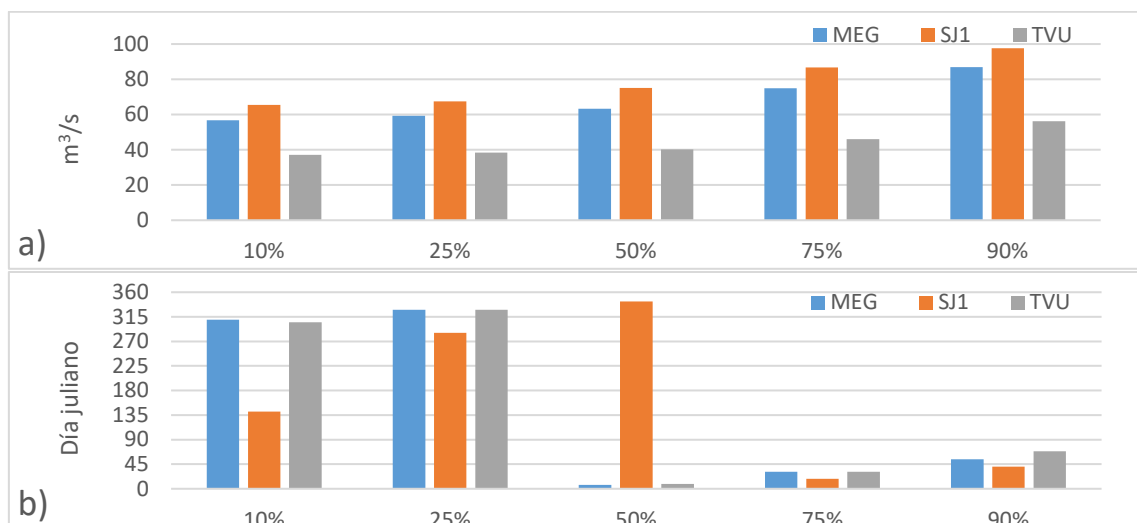


Figura 5. 9. Magnitud (a) y duración (b) de caudales altos para diferentes percentiles de ocurrencia.

Esta clasificación presenta menor amplitud de caudales para los diferentes porcentajes de excedencia, los cuales oscilan entre 40 y 97 m³/s. SJ1 alcanza mayores magnitudes que MEG o TVU, con diferencias relativas medias de 15 y 35 %, respectivamente. En cuanto a su ocurrencia, los percentiles inferiores a 50 se ubican hacia mediados de diciembre, mientras que para un 75 y 90 % del tiempo, éstos ocurren hacia enero. De forma atípica en ocurrencia y magnitud (P₁₀), SJ1 presenta sus caudales altos hacia mediados de abril.

Pequeñas inundaciones

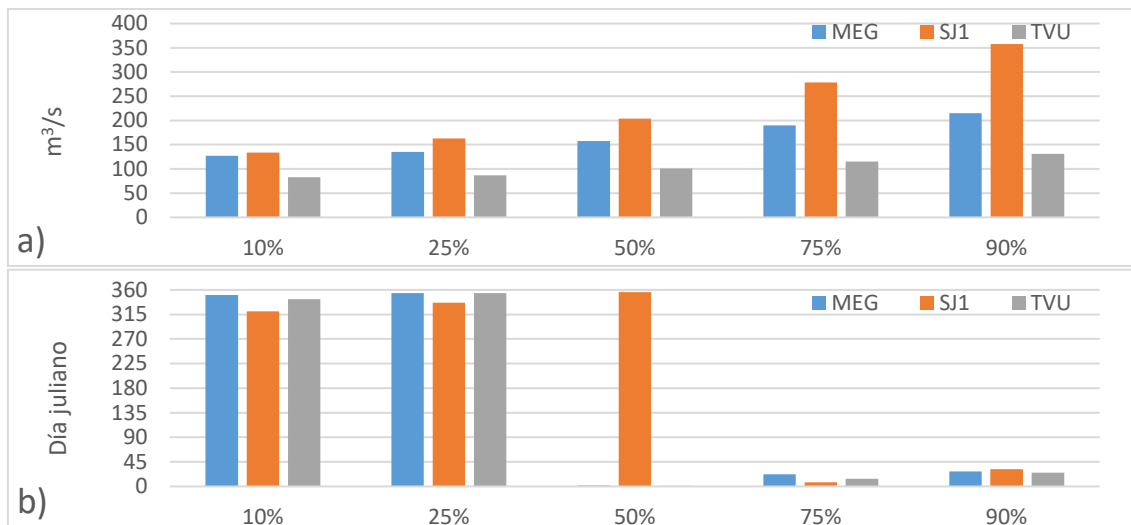


Figura 5. 10. Magnitud (a) y duración (b) de pequeñas inundaciones para diferentes percentiles de ocurrencia.

De ocurrencia más excepcional que los anteriores, alcanza valores máximos en SJ1 para un P₉₀, con 350 m³/s, en promedio situados entre mediados de diciembre y enero.

Grandes inundaciones

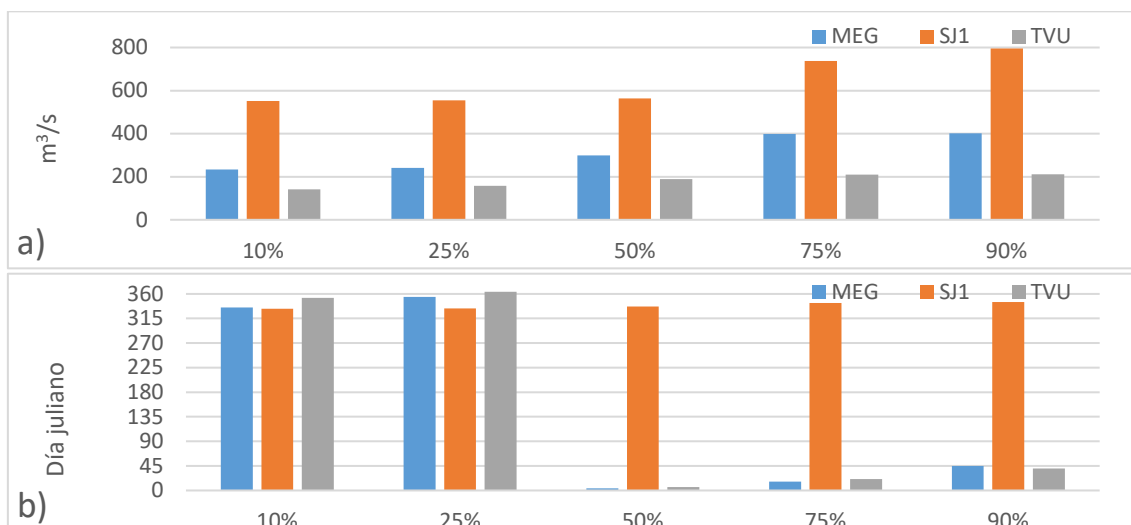
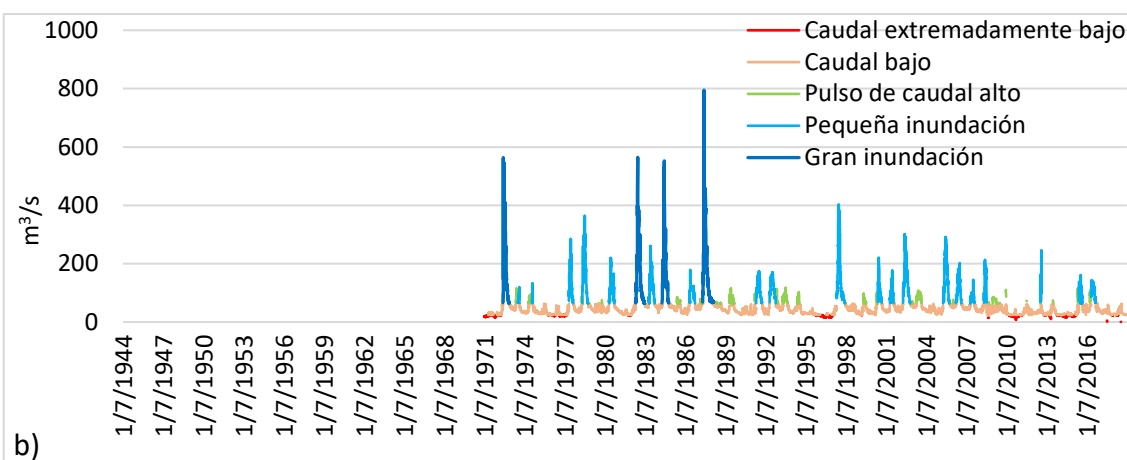
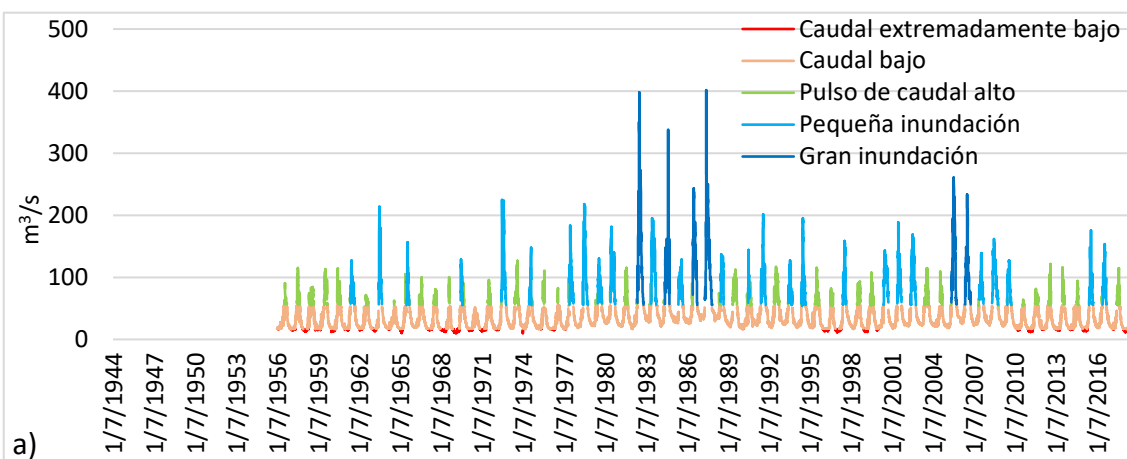


Figura 5. 11. Magnitud (a) y duración (b) de grandes inundaciones para diferentes percentiles de ocurrencia.

Las grandes inundaciones son importantes para el transporte y remoción de sedimentos, así como de inundación de las franjas riparias y lacustres adyacentes a los humedales. Estos eventos alcanzan sus valores máximos en SJ1, los cuales casi triplican en magnitud a MEG y TVU, respectivamente. Para un 90 % de excedencia, SJ1 alcanza 795 m³/s, mientras que las demás estaciones (MEG y TVU) presentan caudales más homogéneos y menores a 400 m³/s. Observados como una serie temporal, en la Figura 5.12 los registros fueron clasificados de acuerdo con la caracterización de los componentes de los caudales ecológicos (EFC) para las estaciones MEG, SJ1 y TVU, respectivamente.

Las cinco categorías mostradas en la Figura 5.12 para MEG, SJ1 y TVU muestran la evolución de los componentes del caudal ambiental en el tiempo. De esta forma, los picos de pulsos altos presentan una recurrencia anual (influidos por los máximos del verano), siendo alternados por pequeñas inundaciones y eventualmente por grandes inundaciones, las cuales presentan máximos de 400, 800 y 200 m³/s para MEG, SJ1 y TVU, respectivamente. Las últimas grandes inundaciones ocurridas simultáneamente en los tres ríos ocurrieron en 1988, siendo seguido por un evento similar durante el verano de 2006. Posterior a dicha fecha, sólo se alcanzaron pequeñas inundaciones a 250 m³/s.



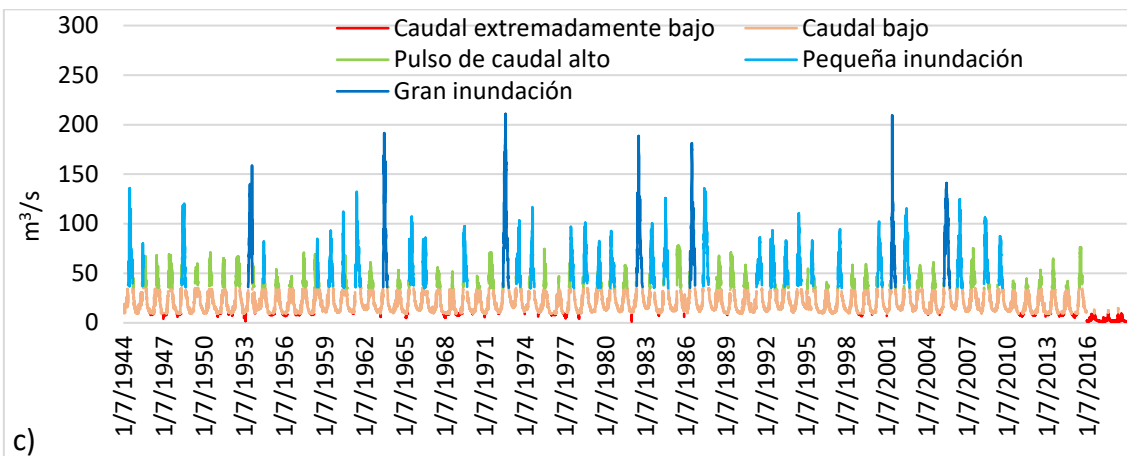


Figura 5. 12. Componentes del caudal ecológico (IHA) para las estaciones MEG (a), SJ1 (b) y TVU (c). Para efectos comparativos visuales, la escala temporal de las series fue ajustada a la longitud disponible en TVU. (Formato fecha MM/DD/AAAA).

Adicionalmente, los pulsos altos siempre están presentes durante las alternancias de los pulsos bajos, presentando ocasionalmente caudales extremadamente bajos de corta duración. A excepción de lo anterior, se resalta a TVU y SJ1, los cuales presentan caudales extremadamente bajos y caudales bajos de forma ininterrumpida desde 2016, lo que coincide con los años de mayor acentuación de la emergencia hídrica decretada en la provincia de Mendoza desde 2010 (expuesta y analizada en el capítulo anterior).

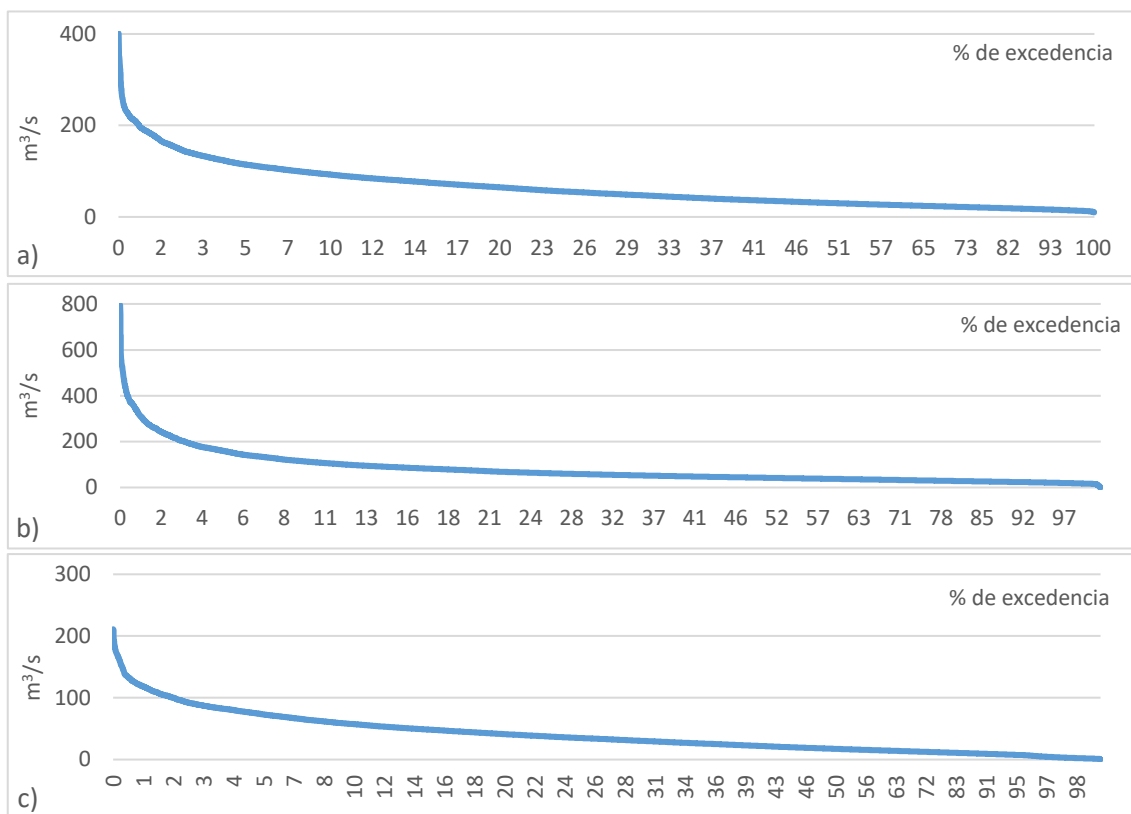


Figura 5. 13. Curva de duración de caudales diarios para las estaciones MEG (a), SJ1 (b) y TVU (c).

Considerando la gran variabilidad de caudales presentes en las series temporales analizadas, las curvas de duración de caudales (Figura 5.13) muestran que los flujos de MEG (Figura 5.13a) igualan o superan los 100 m³/s para un 8 % del tiempo. Esta misma cantidad es igualada o excedida en SJ1 y TVU para un 12 y 2 % del tiempo, respectivamente. Si bien ya se encuentran dentro del rango de caudales excepcionales, salvo TVU, las demás estaciones presentan estos caudales para aproximadamente un décimo del tiempo, lo cual reitera el análisis de EFC presentado en la Figura 5.12.

Los caudales en MEG, SJ1 y TVU son de 17, 24 y 10 m³/s, respectivamente. Esto indica que naturalmente y para un 90 % del tiempo, el agua fluye a través de dichos ríos, representando una sumatoria para el norte del Ramsar y para el mismo porcentaje de excedencia (MEG + SJ1) un caudal de 41 m³/s y para el final del sistema (incluyendo a TVU) de 51 m³/s.

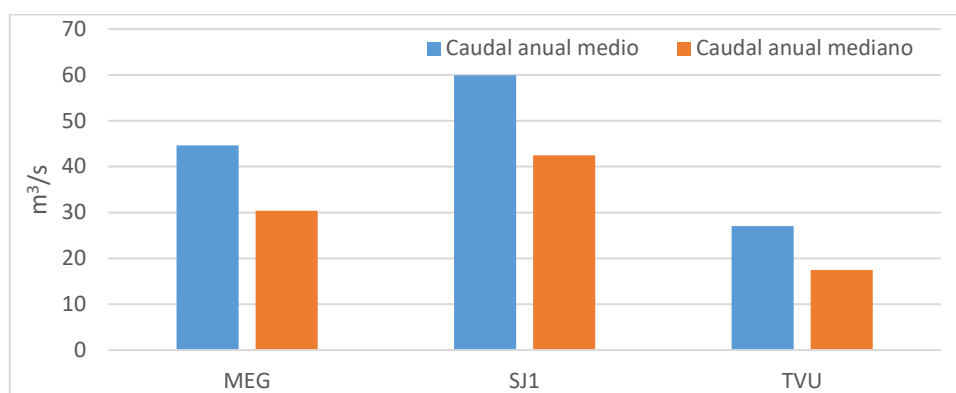


Figura 5. 14. Caudales medios y medianos anuales para las estaciones MEG, SJ1 y TVU.

La diferencia entre los caudales medios sobre los medianos (Figura 5.14) expresa el sesgo positivo de caudales altos por encima del mediano (percentil 50). Esta diferencia es ligeramente más acentuada en SJ1 y MEG que en TVU (lo anterior corrobora la ocurrencia de mayores pulsos de caudales altos en estas estaciones). Por otra parte, y en cuanto a la magnitud, SJ1 aporta los mayores caudales anuales medios y medianos, con un rango entre 40 y 70 m³/s, seguido en los mismos términos por MEG, entre 30 y 44 m³/s y finalmente por TVU, entre 17 y 27 m³/s, respectivamente. De esta forma y sumando los caudales medios anuales de MEG y SJ1 (afluentes a la zona norte del Ramsar), la escorrentía alcanza los 104 m³/s, sumándose a su vez con TVU (como aporte al final del sistema) con 131 m³/s. Es importante resaltar que dichos caudales totales no consideran las pérdidas naturales por infiltración y evaporación, así como tampoco las derivadas por uso humano.

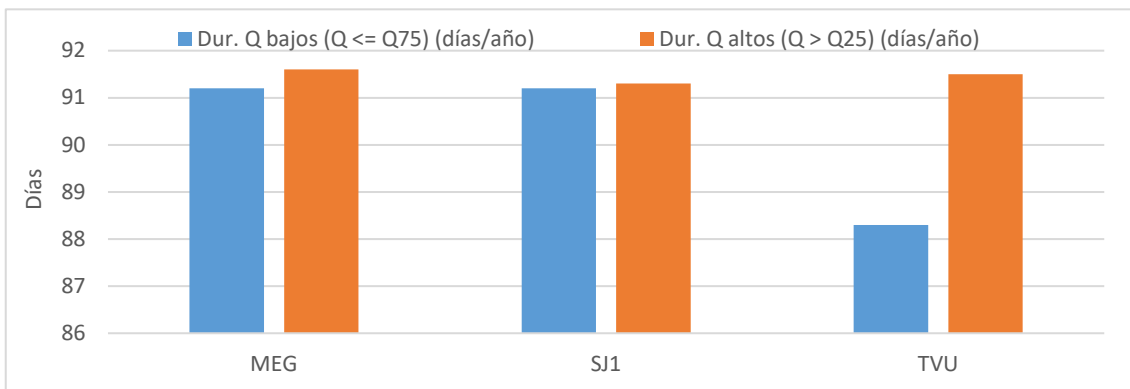


Figura 5. 15. Duración de caudales bajos y altos por año para las estaciones MEG, SJ1 y TVU.

El rango de duración de caudales bajos y altos (Figura 5.15), oscila entre los 88 y 91 días, por lo que su magnitud (días/año) puede considerarse homogénea. En este sentido y en cuanto a un año hidrológico promedio, los caudales altos y bajos tienen aproximadamente la misma duración (≈ 3 meses). De lo anterior y basado en las curvas de duración de caudales (Figura 5.13), se deduce que el resto de 90 días está situado a las márgenes de la distribución de caudales anuales, es decir, >Q75 y <Q25, en donde se ubican los caudales elevados y muy bajos, respectivamente. Como parte del análisis de predictibilidad, consistencia y contingencia de Colwell (Colwell, 1974, citado por EBISA, 2017), en la Figura 5.16 y Tabla 5.4 se expresan los resultados gráficos y tabulares de dichos índices.

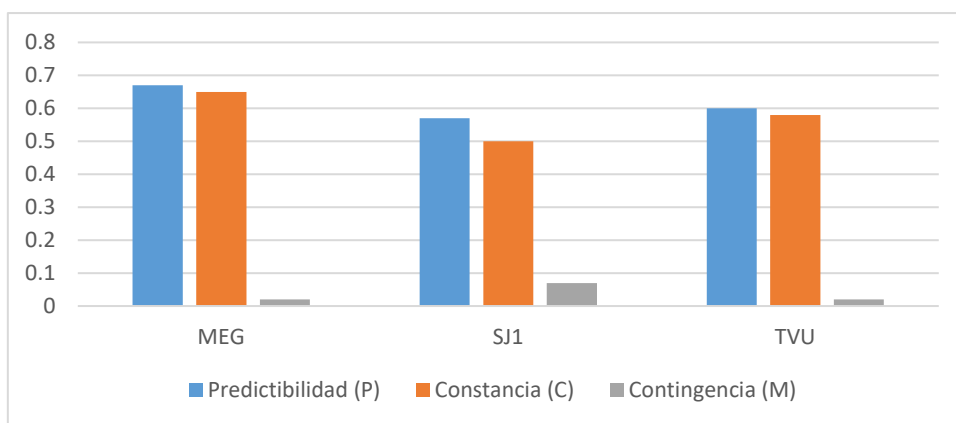


Figura 5. 16. Índices de predictibilidad P (a), constancia C (b) y contingencia M (c) de Colwell.

Tabla 5. 4. Cocientes entre los índices de Constancia (C) y Contingencia (M) versus Predictibilidad (P) de Colwell.

Estación	MEG	SJ1	TVU
Predictibilidad P	0,67	0,57	0,60
Constancia (C)	0,65	0,50	0,58
Contingencia (M)	0,02	0,07	0,02
Cociente C/P	0,97	0,87	0,96
Cociente M/P	0,03	0,13	0,04

La predictibilidad relativa media (entre 0,57 y 0,67) de las tres estaciones (Figura 5.16, Tabla 5.4) está fuertemente influenciada por la Constancia (C), cuyo cociente C/P es superior al 87 % para todas las estaciones. Este cociente explica que la predictibilidad está sujeta a la relativamente alta Constancia de los caudales, los cuales varían poco entre meses y años, teniendo relación con las épocas de altos y bajos caudales dados por la alternancia natural del ciclo hidrológico.

Los valores relativamente altos de predictibilidad explican variaciones temporales de caudales medios a bajos. Estas medidas pueden expresar indirectamente que las estrategias adaptativas de los ecosistemas riparios aguas abajo pueden estar condicionadas por la predictibilidad de la ocurrencia de flujos naturales en los cauces afluentes al humedal.

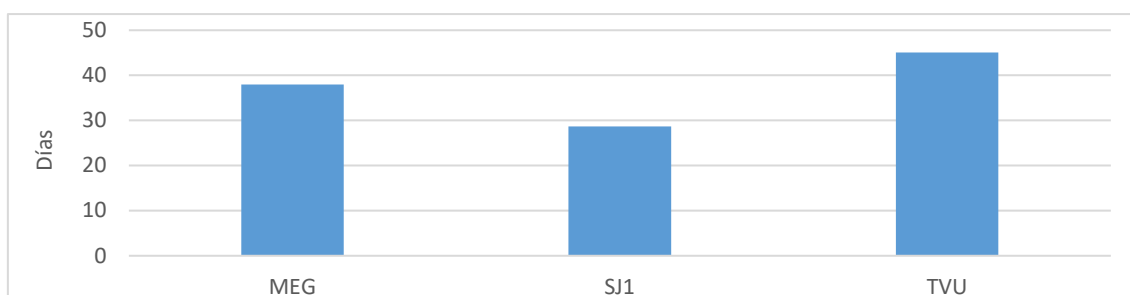


Figura 5. 17. Frecuencia anual promedio de $Q > 3*Q_{50}$

Como parte de la frecuencia anual promedio de caudales (Figura 5.17), los flujos mayores a tres veces el percentil 50 de caudales, oscilan entre 28 días para SJ1, hasta 38 y 45 días para MEG y TVU, respectivamente. Estos valores representan un aproximado del 10 % anual.

Caudales ambientales (QA) de acuerdo con métodos hidrológicos

En esta sección se comparan los caudales ambientales calculados de acuerdo con lo presentado en la metodología.

Caudales ambientales como fracción de una medida de tendencia central

Porcentaje fijo del caudal anual medio

Basado en el caudal anual medio fijo (10 %), en la Figura 5.18 se exponen los caudales ambientales (QA) frente a las escorrentías medias mensuales en MEG, SJ1 y San Juan – El Encón (ELC) (Figura 5.1). Al ser un caudal fijo, la relación estructural con el hidrograma natural medio se pierde, siendo aún insuficiente para satisfacer a los ya mermados caudales en ELC durante los meses de invierno (Figura 5.18a) o a Desaguadero – Salto de la Tosca (DST) (Figura 5.18b). La comparación realizada con los caudales medios mensuales de MEG, SJ1 y

TVU, tiene como objetivo exponer las diferencias entre la estructura de flujos naturales y la propuesta por la metodología de porcentaje fijo.

Si bien existen varias legislaciones mundiales que utilizan este método (p. ej., España, Francia, Colombia, Costa Rica), el mismo no es representativo de las variaciones naturales de las escorrentías, así como tampoco de las magnitudes de estas. De esta forma, puede representar un detrimento para ecosistemas y sociedades dependientes del recurso aguas abajo de las fuentes de agua.

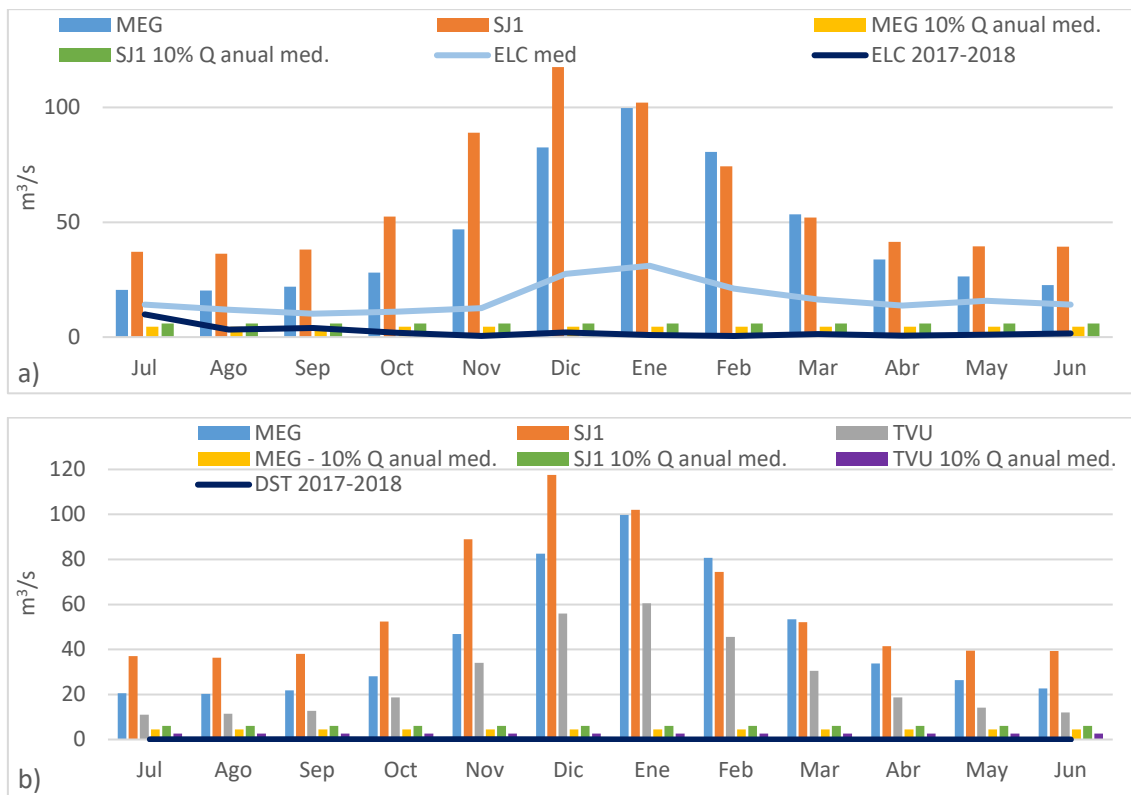


Figura 5. 18. Caudales ambientales calculados como porcentajes fijos del caudal anual medio (10 %). El gráfico superior (a), compara la escorrentía media de MEG, SJ1, ELC med y ELC 2017-2018, versus los caudales ambientales que escurren a la región noroccidental del sitio Ramsar (SJ1 10 % y MEG 10 %). El gráfico inferior (b) y similar al gráfico (a), realiza la comparación respecto a la sección inferior del sitio Ramsar, comparando los caudales ambientales de MEG, SJ1 y TVU versus Desaguadero – Salto de la Tosca (DST).

Método del Ministerio de Medio Ambiente de la República de Chile

Aun con caudales medios mensuales fijos (20 %) y con límite superior en el 20 % medio anual, la diferencia entre los caudales propuestos y los observados en ELC (Figura 5.19a) sobrepasa medidas de magnitud y estructura (similar situación con la Figura 5.19b). Si se suman los caudales de invierno de MEG y ELC, éstos pueden llegar a sobrepasar en algunos meses a la curva de ELC (Figura 5.19a); sin embargo, el límite superior impuesto en 20 % no permite que se emulen las situaciones de crecidas. En este sentido y afín a los resultados producidos por

las metodologías ABF y el Servicio de Pesca y Vida de EE. UU, los resultados no son capaces de satisfacer las demandas hídricas del humedal de estudio.

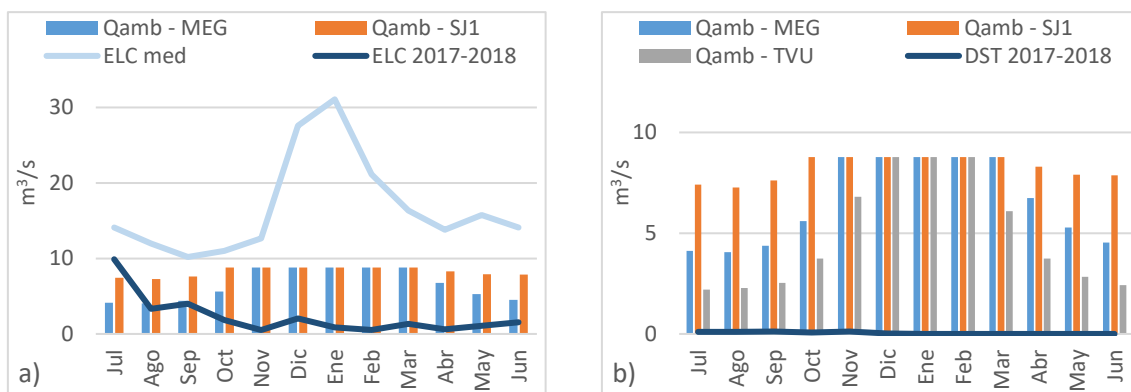


Figura 5. 19. Caudales ecológicos mínimos de acuerdo con el método utilizado por el Ministerio de Medio Ambiente de la República de Chile. La comparación se realizó con los caudales medios mensuales del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b).

Método de Tennant

Para los escenarios sugeridos por el método de Tennant (Figura 5.20), a partir de la categoría cualitativa de caudales “buenos” (Figura 5.20c) éstos sobrepasan a la curva de ELC. Esto quiere decir que utilizan porcentajes del caudal medio superiores al 20 %, resultando en una situación similar con el método propuesto de reforma a la legislación argentina. Sin embargo, los límites superiores de cada categoría corresponden a la clase superior (20 % por encima), lo que establece un umbral superior para los caudales altos.

Si bien autores como (Arthington y Zalucki, 1998, citado por Pantoja, 2017) limitan su uso para cuencas con regulaciones hidráulicas como represas, su análisis permite establecer una idea acerca de los porcentajes que deberían establecerse para el cálculo de caudales ambientales. Si bien el escenario óptimo es que el caudal ambiental sea lo más cercano posible al natural, las realidades locales de consumo hídrico no siempre lo permiten.

Tal como se observa en las imágenes donde TVU y DST están presentes (Figura 5.20 b, d, f y h), el contraste con DST es absoluto, dada su casi nula escorrentía.

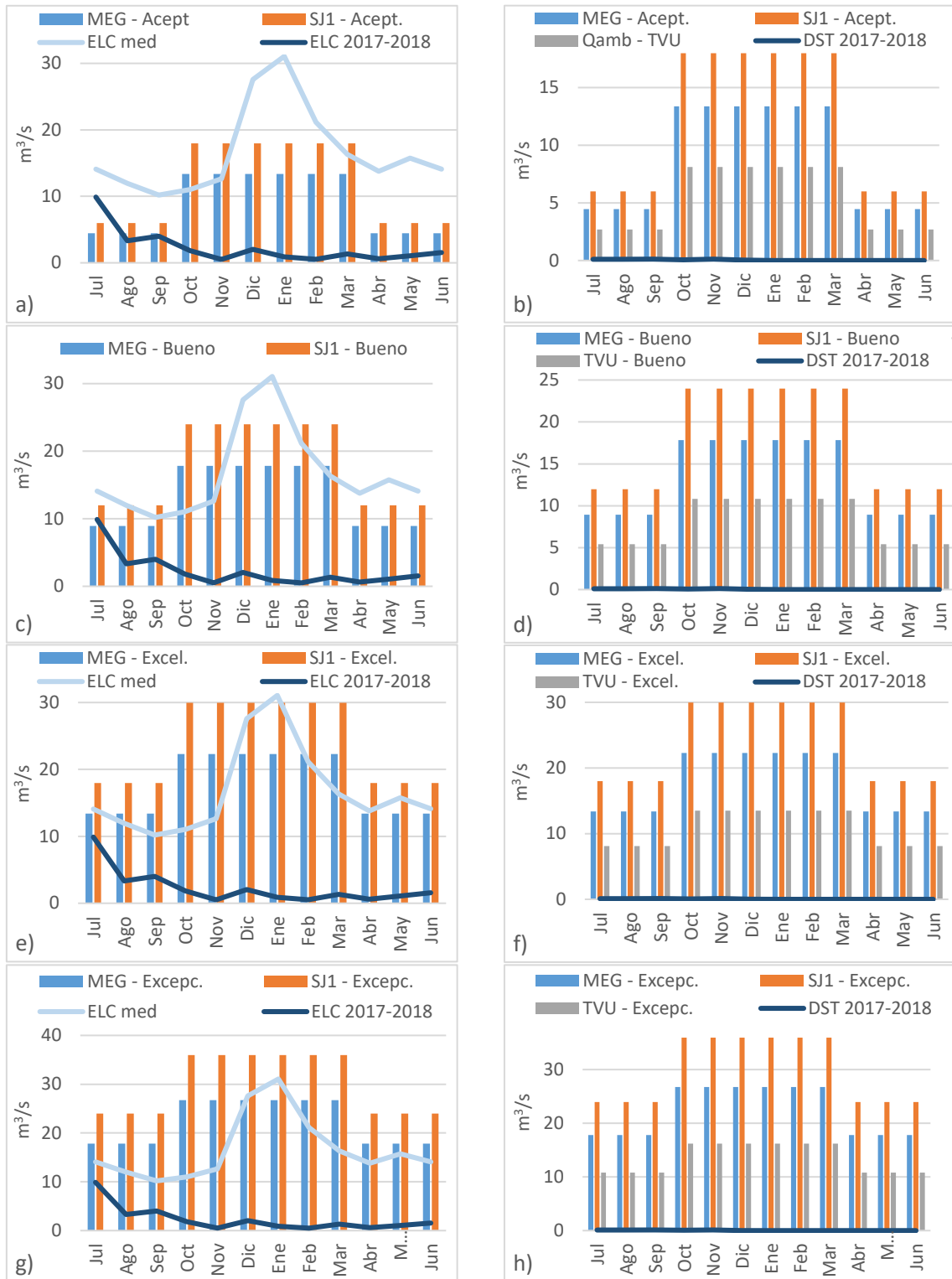


Figura 5. 20. Caudales ambientales calculados por el método de Tennant (Arthington y Zalucki, 1998, citado por Pantoja, 2017) categorías: aceptable (a, b), bueno (c, d), excelente (e, f) y excepcional (g, h). El contraste se realizó entre los caudales medios mensuales y los del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a, c, e, g) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b, d, f, h).

Caudales ambientales asociados a una probabilidad

Método de 7Q10: mediante este método (Figura 5.21), el mantenimiento de caudales fijos (basados en una probabilidad) no considera el régimen de variabilidad natural en la zona, por lo que en ciertos momentos del año sobreestima una oferta de agua que puede no ser significativa en aspectos ecológicos.

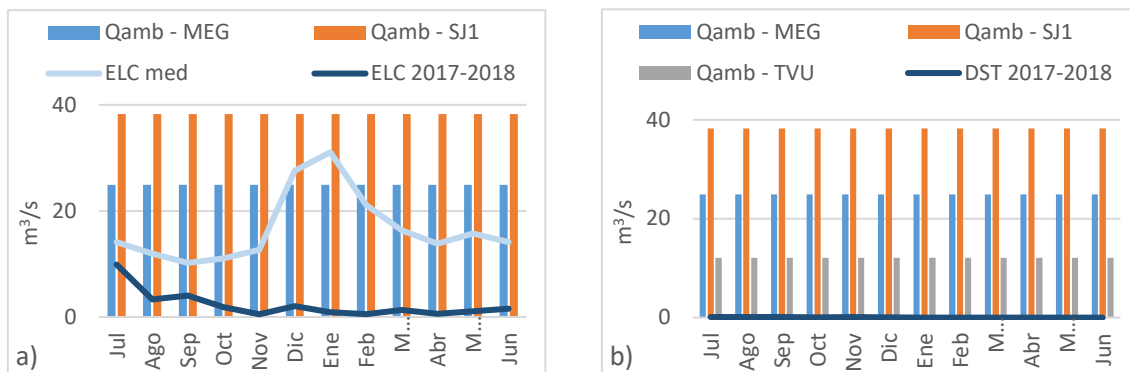


Figura 5. 21. Caudales ambientales de acuerdo con el método de 7Q10. La comparación se realizó con los caudales medios mensuales del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b).

Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales

Método de Matthey

Expresado como el caudal superado en 300 días al año, el método de Matthey (Lozano et al., 2011) (Figura 5.22) se basa en el análisis de la curva de duración de caudales. Lo anterior se expresa como un caudal fijo, que puede satisfacer las demandas en algunos meses del año (inviernos), con detrimento de la época estival (Figura 5.22a). Al igual que con la Figura 5.22b, Matthey (Lozano et al., 2011) expone resultados en situaciones similares al método de ABF y el Servicio de Pesca y Vida de EE. UU (Figura 5.27).

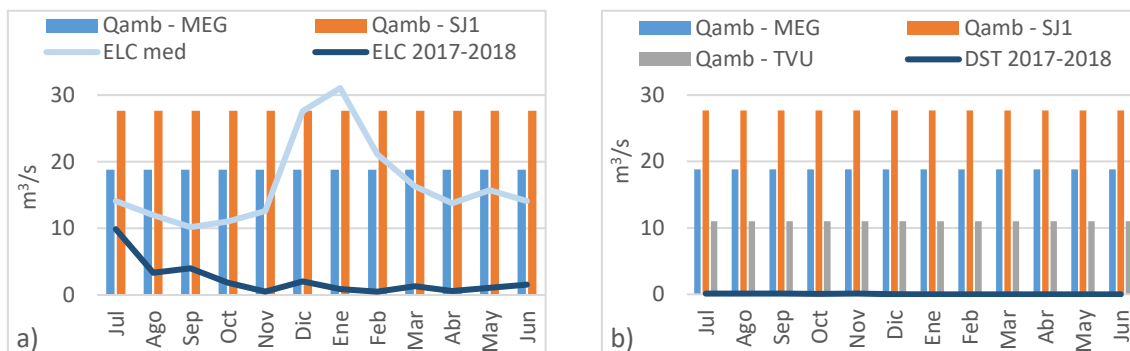


Figura 5. 22. Caudales ambientales calculados por el método de Matthey (Lozano et al., 2011). El contraste se realizó entre los caudales medios mensuales y los del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b).

Método de Hoppe

Los resultados fueron obtenidos a través del método de Hoppe (Díez, 2000), cuyos caudales sugeridos se derivan de curvas de duración de caudales. La utilización de caudales de limpieza (Q₁₇), mantenimiento (Q₄₀) y mínimo de hábitat (Q₈₀) se establecen de acuerdo con sus usos. De esta forma, los caudales de limpieza se usan para remoción y transporte de sedimentos, siguiendo con el de mantenimiento de ecosistemas hasta el mínimo de hábitat, igualado o excedido en un 80 % del tiempo.

Si bien los caudales varían respecto a las categorías, los montos de éstos son permanentes en el tiempo, por lo que estarían a merced de la autoridad regulatoria y sin un calendario de alternancia establecido. Lo anterior podría ocasionar conflictos relacionados al balance de oferta y demanda de agua en el sistema hídrico entre las cuencas altas y bajas.

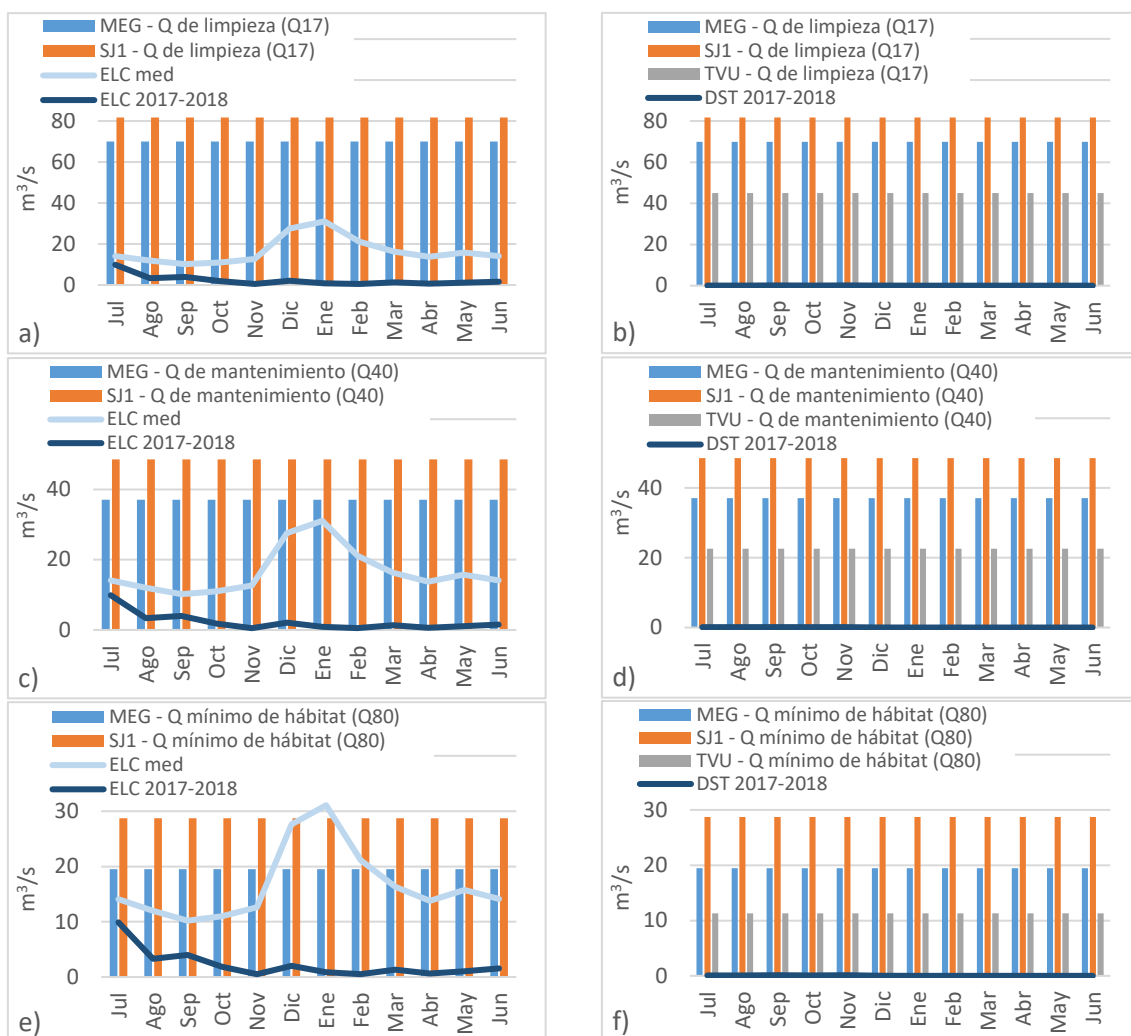


Figura 5. 23. Caudales ambientales calculados por el método de Hoppe (Díez, 2000), categorías: caudal de limpieza Q₁₇ (a, b), caudal de mantenimiento Q₄₀ y caudal mínimo de hábitat Q₈₀ (e, f). El contraste se realizó entre los caudales medios mensuales y los del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a, c, e) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b, d, f).

Método de NGPRP (programa de recursos de las grandes llanuras septentrionales)

El método de la NGPRP (Figura 5.24) establece los caudales ambientales de acuerdo con percentiles derivados de la curva de duración de caudales diarios para el mes analizado. De esta forma, al categorizar entre meses húmedos y secos, asigna un Q_{90} y un Q_{50} respectivamente para cada uno. La determinación de caudales mayores en meses secos prioriza las demandas hídricas de estos meses, reduciendo el porcentaje para meses húmedos. Por consiguiente, la sumatoria de MEG y SJ1 (Figura 5.24a) supera ampliamente a la curva de ELC (con similar situación para la Figura 5.24b, incluyendo a TVU respecto a DST).

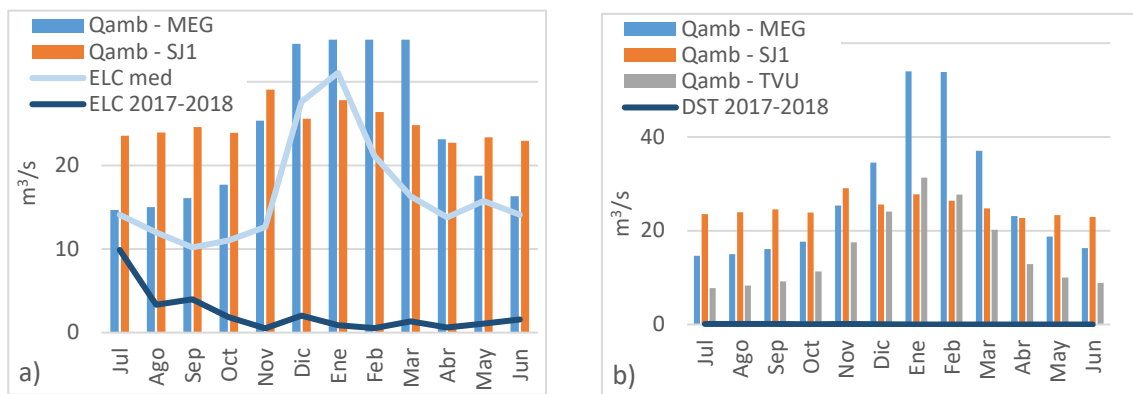


Figura 5. 24. Caudales ambientales calculados por el método del Programa de recursos de las grandes llanuras septentrionales (NGPRP, Northern Great Plains Resources Program). La comparación se realizó entre los caudales medios mensuales y los del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b).

Método del Q_{95} (método colombiano)

La utilización del Q_{95} mensual para obtener caudales ambientales (Figura 5.25), permite que los flujos mensuales estén presentes en al menos un 95 % del tiempo (Lozano et al., 2011). De esta forma, se considera como un caudal base mensual, cuya sumatoria para MEG y SJ1 en la Figura 5.25a supera en magnitud al hidrograma de ELC. Cabe destacar que en situaciones similares con el método de Utah (Lozano et al., 2011, Figura 5.28), los caudales de SJ1 no presentan una estructura similar a la del hidrograma natural del río. Lo anterior podría concurrir en una subestimación de los caudales ambientales en la región.

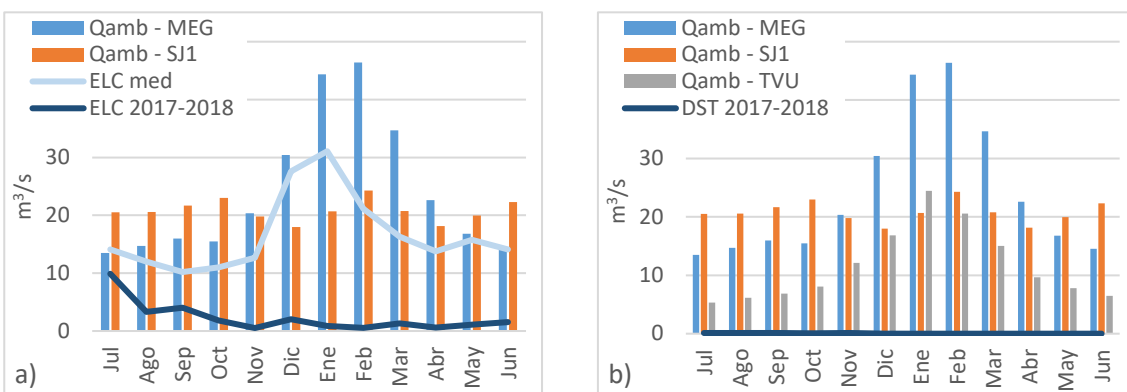


Figura 5. 25. Caudales ambientales calculados por el método del Q95 – Método colombiano (Lozano et al., 2011). El contraste se realizó entre los caudales medios mensuales y los del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b).

Método del caudal de mantenimiento

Respecto al caudal de mantenimiento (Figura 5.26a), los flujos calculados en MEG y SJ1 representan la escorrentía que debería fluir hacia el norte del sitio Ramsar. Por su parte, la curva de caudales medios de ELC presenta una relación estructural estrecha respecto a MEG y SJ1, cuyos coeficientes de correlación de Pearson se posicionan en 0,88 y 0,78, respectivamente. Los caudales de mantenimiento presentan sus valores mayores hacia los meses de verano, coincidiendo con ELC. Sin embargo, más allá de la relación estructural, la magnitud difiere entre ELC versus MEG y SJ1, con un promedio porcentual medio de 57 y 127 %, respectivamente. Esta diferencia expresa que el caudal ambiental calculado no se corresponde con el observado en ELC. Analizando detenidamente y suponiendo que SJ1 no fluyera hacia el Ramsar, los caudales de ELC tampoco alcanzan a los de MEG, por lo que se intuye que esa diferencia de agua se está perdiendo o derivando hacia otra actividad.

La situación respecto a los dos últimos años de registros de ELC es más compleja, ya que las diferencias son más abruptas en cuanto a magnitud y estructura. En este sentido, los máximos de los dos años ocurren hacia el invierno, dejando a enero con caudales que apenas alcanzan 1 m³/s, frente a los 39 y 46 m³/s de MEG y SJ1 en el mismo mes. Los caudales de TVU, los cuales junto a MEG y SJ1 representan la mayoría de las escorrentías que fluyen naturalmente al sitio Ramsar, se muestran en la Figura 5.26b. Si bien DST sólo presenta dos años, sus caudales son prácticamente nulos (≤ 0.1 m³/s). Observando la Figura 5.1, la distancia entre la desembocadura del río Tunuyán y DST es de aproximadamente 70 km, pero esta estación presenta escorrentías bajas o nulas.

Lo anterior y de acuerdo con el método analizado expresa el desbalance de afluencia de agua desde las cuencas altas a las partes bajas (sitio Ramsar), en detrimento del mantenimiento de los ecosistemas riparios y lacustres del humedal.

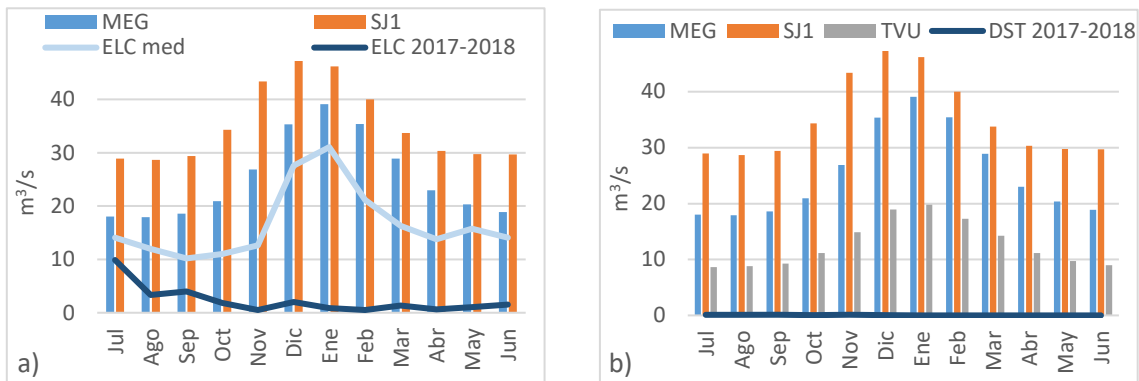


Figura 5. 26. Método del caudal de mantenimiento. Dada la forma del sitio Ramsar, el primer contraste (a) se realiza con la escorrentía de caudal de mantenimiento de MEG y SJ1 versus ELC (med) y ELC para el año hidrológico 2017-2018. El segundo contraste suma los caudales de caudal de mantenimiento de TVU versus los caudales medios (no visibles por escala gráfica) en DST (2017-2018).

Métodos que establecen un valor de caudal ambiental para cada mes del año

Métodos de ABF y el Servicio de Pesca de EE. UU (Huguenin, 2017)

Si bien los métodos de ABF y el Servicio de Pesca y Vida de EE. UU no utilizan porcentajes fijos (Figura 5.27), se basan en la mediana y media mensual del mes más seco, respectivamente. Los resultados de ambos métodos presentan diferencias < 1 %, por lo que fueron incluidos en los mismos gráficos. Los resultados exponen que los caudales ambientales presentan como límite inferior al mes más seco; sin embargo, al ser fijo, no alcanza a emular a los caudales máximos durante el verano. Los caudales ambientales sobrepasan la curva media de ELC en todos los meses, con situación similar respecto a DST. Como sumatoria para el norte del sitio Ramsar, los flujos fijos de MEG y SJ1 aportan 56 m³, alcanzando 67 m³ si se considera a TVU al final del sistema.

Al tener como límite al mes más seco, estos métodos consideran los mínimos caudales sobre este umbral, garantizando la totalidad de provisión de agua para épocas de estiaje. Sin embargo y sobre estas metodologías, al no sugerir que los caudales ambientales sigan el patrón natural del hidrograma, pueden concurrir en un déficit hídrico hacia los ecosistemas durante épocas de crecidas.

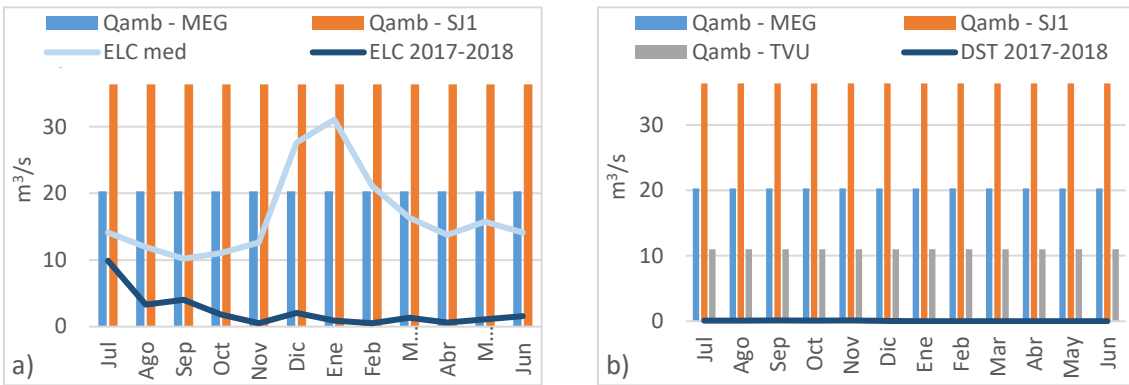


Figura 5. 27. Caudales ambientales calculados por ABF y el Servicio de Pesca de EE. UU (Huguenin, 2017). la diferencia de valores entre ambos métodos es inferior al 1 %. El contraste realizado se ejecutó entre los caudales medios mensuales y del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b).

Método de Utah

Con respecto al método Utah (Figura 5.28a), la afluencia de los caudales ambientales presenta relación estructural con ELC, siendo superiores en casi un 100 % en cuanto a magnitud. Lo anterior se describe observando cómo la curva de MEG es similar en estructura y magnitud a ELC; si se considera la afluencia de SJ1, los caudales se elevarían considerablemente por encima de los observados en ELC (alterados). En términos similares se puede analizar la Figura 5.28b, con la afluencia de TVU.

Uno de los inconvenientes de este método radica en la utilización de los mínimos mensuales históricos como caudales ambientales, los cuales representan un límite inferior que posiblemente no emulen la estructura natural de los hidrogramas. De esta forma y observando a SJ1 en la Figura 5.28a, el patrón generado no supera a MEG en los meses de verano, incluso cuando sí sucede en términos de caudales medios mensuales.

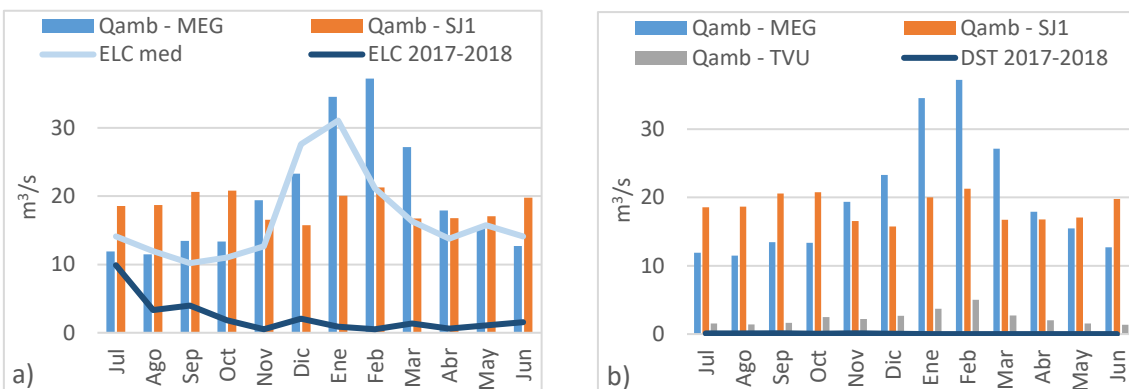


Figura 5. 28. Caudales ambientales calculados por el método Utah (Lozano et al., 2011). El contraste se realizó entre los caudales medios mensuales y los del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b).

Método basado en la propuesta de reforma a la Ley argentina 25688

Basado en el 20 % del caudal medio mensual, la propuesta de reforma a la Ley argentina 25688 (Figura 5.29) intenta emular la estructura de los hidrogramas naturales, dejando fluir sólo el 20 % mensual y permitiendo hacer uso del 80 % restante. Si bien la suma de MEG y SJ1 sobrepasa la curva de ELC en 9 de los 12 meses del año (Figura 5.29a), los caudales ambientales aún son insuficientes para los meses invernales. Respecto a la Figura 5.29b y con la suma de TVU, los caudales sumados durante el mes de enero son aproximadamente 50 veces más elevados que los registrados en DST.

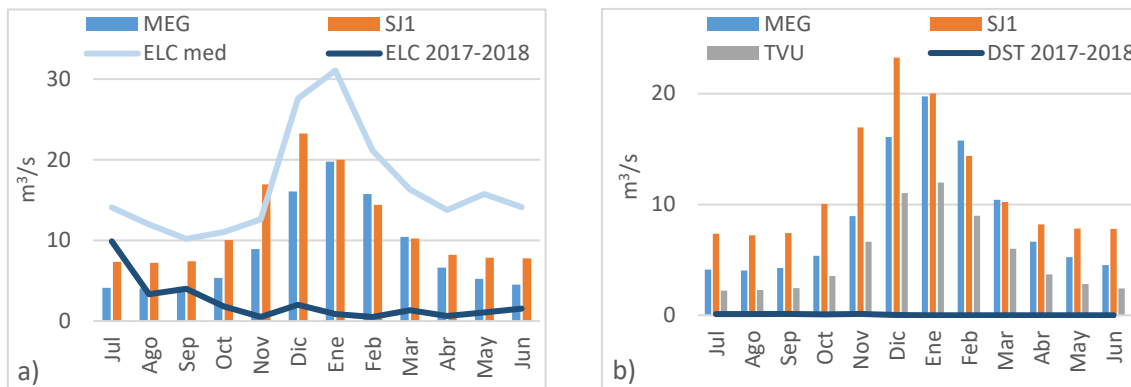
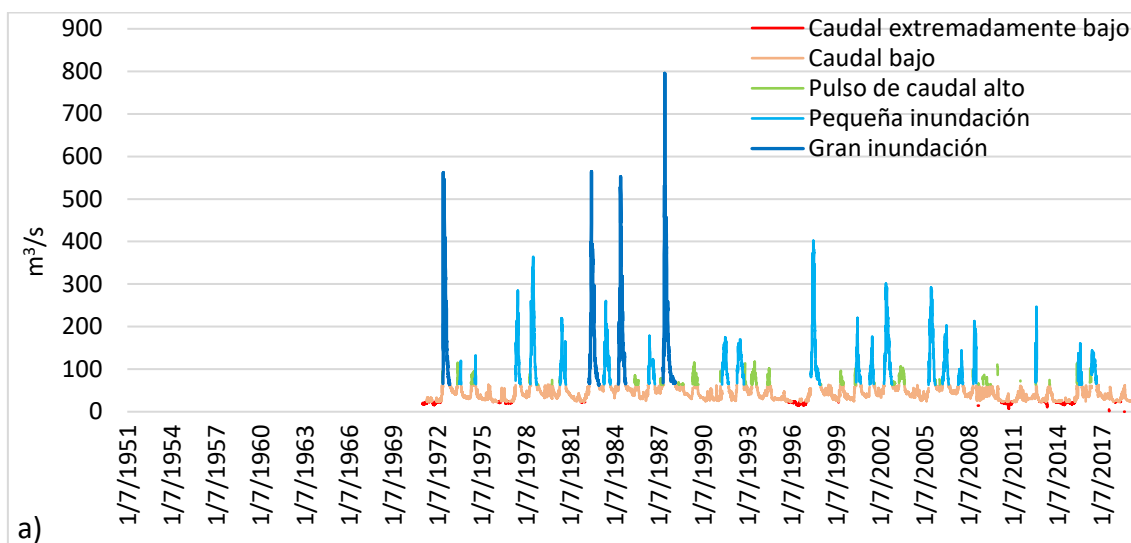


Figura 5. 29. Caudales ambientales por la metodología de reforma propuesta a la Ley 25688 de la República Argentina. El contraste se realizó entre los caudales medios mensuales y del año hidrológico 2017-2018 de ELC (a) y los caudales medios de 2017-2018 de DST (b).

Impactos de la instalación de la represa Los Caracoles sobre el río San Juan

Dado el impacto generado por la construcción y llenado de la represa Los Caracoles (Figura 5.1), el análisis gráfico realizado a través del software IHA (Indicadores de Alteración Hidrológica) muestra los componentes del caudal ecológico (EFC) para las estaciones SJ1 y SJ4 (Figura 5.30).



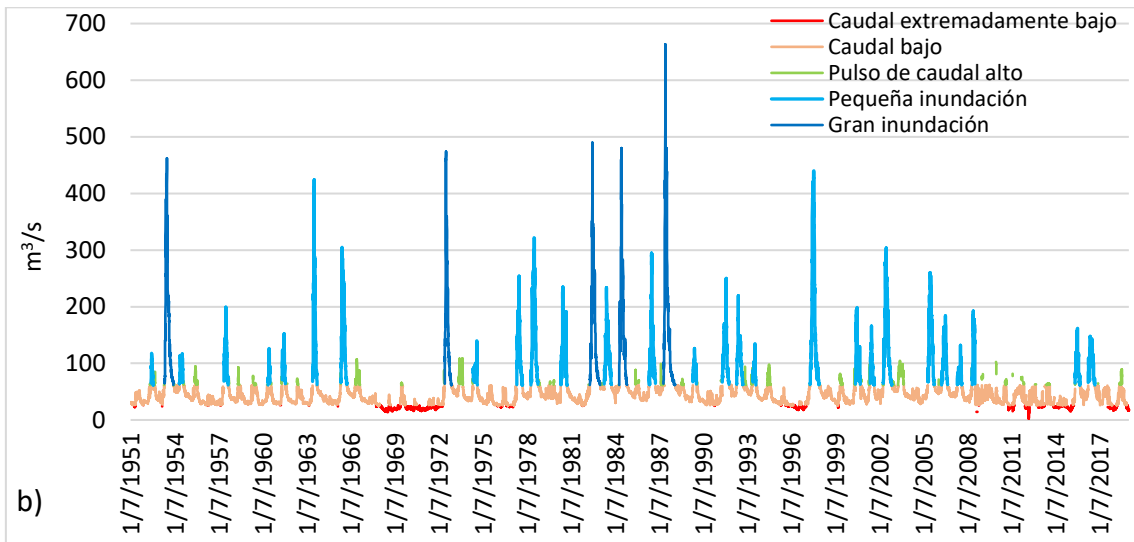
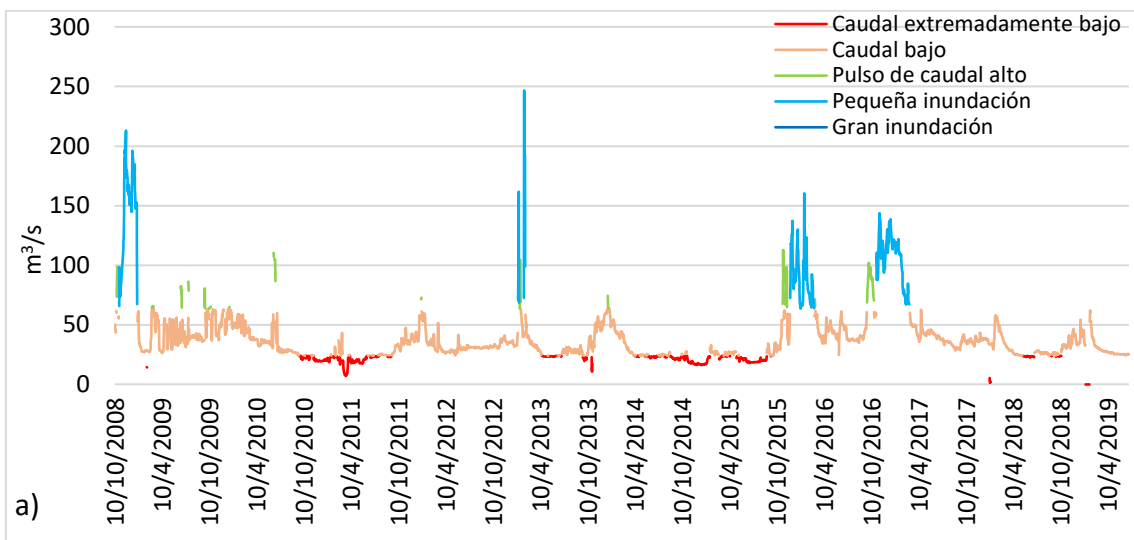


Figura 5. 30. Componentes del caudal ecológico (EFC) para la estación SJ1 (a) y SJ4 (b). El período inicial (7/1/1944) fue establecido de acuerdo con la serie temporal disponible de TVU (Figura 5.12). (Formato fecha MM/DD/AAAA).

Realizando una comparación visual y previa a octubre de 2008, la serie de caudales de SJ4 (Figura 5.30b) presenta similitudes respecto a SJ1 (Figura 5.30a). Si bien ambas estaciones aforan el mismo río, posterior al año 2008 y con la construcción de la represa Los Caracoles, las series aguas abajo se muestran alteradas y sin la histórica relación con los caudales aguas arriba. En la Figura 5.31 y haciendo énfasis desde el 10 de octubre de 2008, se muestra la misma comparación entre las estaciones SJ1 y SJ4, bajo un contexto de escala temporal de mayor detalle.



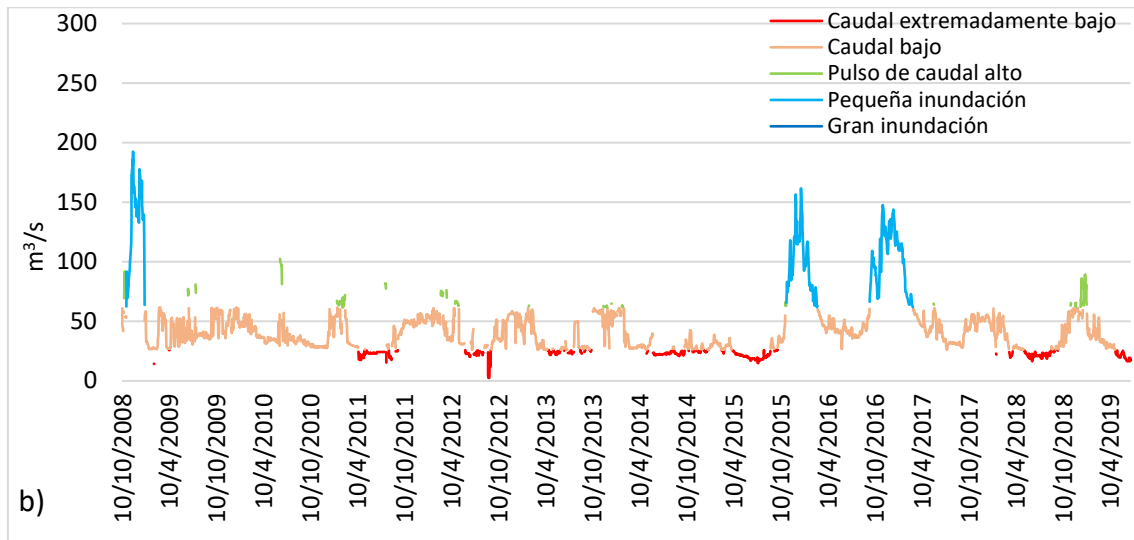


Figura 5. 31. Componentes del caudal ecológico (EFC) de la estación SJ1 (a) y SJ4 (b), en el período desde el 10 de octubre de 2008 al 30 de junio de 2019 (formato fecha MM/DD/AAAA).

Las series graficas en la Figura 5.31 comienzan luego de la construcción de la represa Los Caracoles. Cronológicamente, la primera diferencia visible sucede el 22 de junio de 2010, con la disminución de la magnitud de un pulso de caudal alto. Posteriormente, aguas arriba comienza un período de caudales extremadamente bajos (12 de octubre de 2010), el cual sólo comienza aguas abajo el 10 de mayo del 2011; lo anterior indica una fase de erogación de la represa.

Posteriormente y tratándose del evento más significativo, aguas arriba (SJ1) se registra un pulso de pequeña inundación el 7 de febrero de 2013 (246 m³/s), el cual es amortiguado por la represa, registrando en SJ4 49,5 m³/s. De esta forma, el pulso de crecida no sigue su recorrido por el río y por ende, no llega al humedal.

El evento del 7 de febrero de 2013 fue documentado por el Diario de Cuyo (2013) en la misma fecha. Su titular (Figura 5.32), expresa lo siguiente:



Figura 5. 32. Titular del Diario de Cuyo (2013), reportando sobre la situación en la quebrada La Flecha (provincia de San Juan) el 7 de febrero de 2013.

Si bien esta quebrada se ubica aguas abajo de las estaciones de aforo involucradas en del río San Juan, referencia el evento de precipitaciones que causaron la pequeña inundación del 7 de febrero, amortiguado por la represa Los Caracoles. Sin dicho efecto, las consecuencias por crecidas habrían sido mayores aguas abajo, sin embargo y desde el punto de vista ecológico, representó un pulso de inundación que nunca llegó al sitio Ramsar.

Otro ejemplo de la amortiguación de los pulsos de alto caudal por la represa lo muestra lo ocurrido 26 de diciembre de 2013 (Figura 5.31). El 2 de enero de 2019, la represa descargó caudales que se manifestaron como un pulso de caudal alto, sin tener relación con lo registrado en SJ1. Finalmente, y a partir del 28 de abril de 2019, SJ4 registra caudales extremadamente bajos, los cuales son inferiores a los caudales bajos medidos en SJ1.

Dada la existencia de represas sobre el río Mendoza (Potrerillos), San Juan (Los Caracoles, Punta Negra y Ullúm) y Tunuyán (Carrizal), el impacto sobre los caudales sólo pudo ser evaluado en San Juan, dado que SJ1 se ubica aguas arriba de los aprovechamientos (Figura 5.1), con SJ4 aguas abajo del primero de estos (Los Caracoles).

En este sentido y observando los resultados del contraste entre SJ1 y SJ4, se puede inferir que los caudales del río Mendoza y Tunuyán también están afectados por el efecto regulador de las represas. De esta forma, las escorrentías andinas que afluyen al sitio Ramsar son alteradas por estos aprovechamientos hidráulicos, cuyas funciones radican en: amortiguación de crecidas, generación de hidroelectricidad y almacenamiento de agua para efectos de dotación doméstica y riego.

DISCUSIÓN

Dada la importancia del reconocimiento, cálculo e implementación de los caudales ambientales, la comparación de los diversos métodos para su estimación cobra relevancia. En este sentido, los distintos métodos utilizados en el análisis permiten evaluar sus potencialidades y debilidades, en pro o en contra de los objetivos ambientales que se persiguen. Como parte de un diagnóstico general, partir del análisis de las medias anuales y mensuales permite obtener una idea acerca del estado hidrológico de las estaciones y ríos analizados. Como situación ideal y en la medida de las posibilidades, se priorizó la comparación entre los datos aguas arriba y aguas abajo de los aprovechamientos antrópicos.

Esta estrategia fue aprovechada para la comparación de los caudales ambientales estimados y los datos de San Juan – El Encón (ELC), que, aunque presenta una menor longitud de datos, permite comparaciones mediante promedios mensuales. Previo al cálculo de los diversos métodos seleccionados, el análisis mediante IHA permitió establecer el estado de los caudales (previos a ser catalogados como ambientales). Dicho estado, en términos de magnitud, ocurrencia y categorización, permiten conocer la situación de las series analizadas, así como el contexto en el que transcurrió el tiempo de su ocurrencia. Por lo anterior y como parte del análisis exploratorio, se recomienda su uso.

Muchos de los métodos aplicados denominan las estimaciones como “caudales ecológicos” (ya que fueron formuladas previamente a la propuesta de término de caudales ambientales en la última Declaración de Brisbane de 2018). Sin embargo, dado el objetivo de la investigación sobre el sitio Ramsar y sobre los propios objetivos sobre el cual éste fue declarado (protección de humedales y las sociedades involucradas), se decidió convencionalizar el término y los resultados hallados como “caudales ambientales”.

Algunos de los trabajos consultados y que tratan sobre estimación de caudales ambientales (p. ej., Lozano et al., 2011; Consuegra, 2013; Del Pilar y Corradine, 2014) se calculan de forma puntual, sin contraste sobre la zona objetivo aguas abajo. Para la presente investigación, se priorizó el contraste, pudiendo

establecer mayores o menores desventajas respecto al objetivo ambiental perseguido y de acuerdo con cada una de las metodologías estudiadas.

Con respecto a las metodologías de cálculo de caudales ambientales, algunas existen como propuestas, mientras que otras son legalmente aceptadas por diversos países o regiones. En este sentido, no existe consenso de elección entre un método u otro, ya que los resultados de todos expresan el mismo resultado: caudales ambientales. De esta forma, los trabajos temáticos en general calculan los caudales ambientales sobre la base de las principales metodologías (utilizadas en el presente estudio). Al final, los autores u organismos interesados escogen aquellas magnitudes de flujo que mejor respondan a los objetivos ambientales, pero, sobre todo, a los intereses económicos.

Para el caso del sitio Ramsar, dada la elevada demanda de agua en los oasis irrigados aguas arriba, el establecimiento de caudales ambientales sólo puede significar pérdidas económicas. Lo anterior explica el detrimento histórico de los humedales afectados, la presencia de represas en los tres ríos tributarios y la prácticamente nula afluencia de caudales ambientales al Ramsar. Como parte de los resultados derivados de las metodologías aplicadas, toman ventaja aquellos que priorizan la variabilidad anual de los flujos. Por consiguiente, métodos como el caudal de mantenimiento, la propuesta de reforma a la Ley argentina 25688 y NGPRP, resultan en emular los hidrogramas naturales, superando los flujos observados en San Juan – El Encón y garantizando una mayor provisión de agua al humedal.

De esta forma y como herramienta de gestión, la implementación de un método u otro dependerá del objetivo ambiental a alcanzar, así como de las posibilidades reales de implementación (desde el punto de vista económico). Por tanto, se recomienda a los actores involucrados incorporar en la toma de decisiones a los objetivos ambientales del sitio Ramsar, no sólo desde el punto de vista ecológico, sino también por las poblaciones humanas que lo habitan.

CONCLUSIÓN

La ubicación geográfica del sitio Ramsar (aguas abajo de los oasis y represas), le propicia una situación de vulnerabilidad ante las afluencias de caudales hacia el humedal. Por una parte, dichos caudales se ven afectados en magnitud y variabilidad por la presencia de represas y aprovechamientos humanos en los oasis, por otra, su merma o ausencia propicia la degradación ambiental de la zona.

El análisis de caudales aguas arriba de los aprovechamientos (p. ej., Mendoza – Guido, San Juan – km. 101 y Tunuyán – Valle de Uco) y de acuerdo con los algoritmos de IHA, permitió establecer un vínculo entre el estado de estos y su función de acuerdo con los objetivos ambientales del sitio Ramsar. De esta forma, se observó cómo la mayor parte de las escorrentías andinas no llegan a las zonas bajas de los humedales, presentando alteraciones en magnitud,

frecuencia y ocurrencia (p. ej., en San Juan – El Encón, con máximos anuales tres veces inferiores a los registrados en Mendoza – Guido o en San Juan – km. 101). La alteración alcanza sus máximos valores hacia el extremo sur del sitio Ramsar, donde la estación Desaguadero – Salto de la Tosca registra caudales prácticamente nulos ($\leq 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ en todos los meses).

El cálculo de caudales ambientales por diversos métodos hidrológicos de uso mundial, continental y nacional consistió en obtener diversos resultados bajo potenciales aplicaciones y usos en la zona. En este sentido y derivado de la interpretación de las comparaciones realizadas, los métodos de Caudal de Mantenimiento, propuesta de reforma a la Ley argentina 25688 y NGPRP (Programa de recursos de las grandes llanuras septentrionales), resultan como aquellos con mayor ajuste a las variabilidades observadas aguas arriba y superiores en magnitud en comparación con la estación de San Juan – El Encón (situada dentro de la zona de estudio).

Respecto al método del Caudal de Mantenimiento, los caudales medios en San Juan – El Encón presentaron una relación estructural estrecha respecto a Mendoza – Guido y San Juan – km. 101. En el orden planteado, las diferencias de magnitud entre el primero respecto a los demás varían entre 57 a 127 %. Estas diferencias expresan que hay una parte del agua que se está perdiendo o derivando de los ríos (presumiblemente por causas antrópicas).

Con relación a la propuesta de modificación de la Ley argentina 25688, la suma de caudales de Mendoza – Guido y San Juan km. 101 sobrepasan a la curva de caudales de San Juan – El Encón en 9 de los 12 meses del año, sin embargo, son insuficientes para los meses invernales. Este método es uno de los que mejor emula la estructura de los hidrogramas naturales, dejando fluir como caudales ambientales el 20 % de los caudales mensuales, permitiendo el uso antrópico del 80 % restante.

Finalmente, al priorizar las demandas hídricas basadas en la determinación de caudales mayores en meses secos, el método de NGPRP reduce porcentajes para meses húmedos. En este sentido, la sumatoria de Mendoza – Guido y San Juan – km. 101 superan ampliamente la curva de San Juan – El Encón para todos los meses.

Dadas las ventajas de estas metodologías mencionadas y con fines de objetivos ambientales de sistemas sensibles (como humedales de zonas áridas), se recomienda desestimar las metodologías basadas en porcentajes fijos de caudales anuales, priorizando así aquellas fundamentadas en caudales variables o porcentajes medios mensuales (principalmente los métodos de caudal de mantenimiento, modificación de Ley argentina 25688 y NGPRP)

De acuerdo con el análisis de comparación entre San Juan km. 101 y San Juan km. 47,3, se constató el impacto que las represas (i. e. Los Caracoles) generan sobre las escorrentías. En este caso, se observó que no sólo los caudales fueron alterados en magnitud (25 %), sino también en frecuencia y ocurrencia de pulsos de crecidas luego de la construcción de esta.

Uno de los ejemplos expuestos se relacionó con el evento de crecida ocurrido el 7 de febrero de 2013, el cual fue registrado en San Juan km. 101 (246 m³/s) y amortiguado por la represa Los Caracoles, registrándose en San Juan km. 47,3 apenas 63 m³/s; de esta forma, significó un pulso de crecida que nunca llegó al sitio Ramsar. En este sentido, se resalta la importancia de los pulsos de crecidas e inundaciones para los humedales, los cuales son amortiguados por las represas sin que los detecten en importancia las metodologías de caudales ambientales.

Si bien los caudales ambientales son calculados sobre la base de los registros de estaciones aguas arriba de los objetivos ambientales (p. ej. humedales), las distancias entre estos pueden influir significativamente en el flujo de agua que termina aportando al sitio. De esta forma y a través del Capítulo VI, se propone una alternativa de cálculo que considere las largas distancias mencionadas, en este caso, entre las estaciones Mendoza – Guido, San Juan - km. 101 y Tunuyán – Valle de Uco, versus el sitio Ramsar de estudio.

REFERENCIAS

Arthington, A. Bhaduri, A. Bunn, S. Jackson, S. Tharme, R. Tickner, D. Young, B. Acreman, M. Baker, N. Capon, S. Horne, A. Kendy, E. McClain, M. Poff, N. Richter, B. y Ward, S. (2018). The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows. *Front. Environ. Sci.* 6:45. Doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.201800045>

Arthington, A. y Zalucki, J. (1998). Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Methods. Land and Water Resources Research and Development Corporation. Consultado de: <https://www.researchgate.net/publication/228701645>

ASIC, (s/f). Requerimiento hídrico de los humedales en la cuenca inferior del río Mendoza, demanda ambiental y acciones, en el marco del cambio climático. Consultado de: http://www.asicprimerazona.com.ar/asic/publicaciones/descentralizacion_administraci%F3n_agua.pdf

Candia, R. Chiavazza, H. Devincenzi, S. Elizondo, J. Guevara, M. Gómez, G. Moreiras, S. Pastor, G. Prieto, M. Rodríguez, A. Saá, O, Sosa, H. Torres, L. y Torres, E. (2015). Restauración de un Sistema Ecológico Compartido. Estudio ambiental del Sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Editorial Dunken. Universidad de Congreso, Argentina.

Confederación Hidrográfica del Duero, CHD. (2007). Caracterización de los caudales ambientales. Ministerio de Medio Ambiente. Confereración hidrográfica del Duero. Consultado: de: <http://www.chduero.es/Portals/0/OficinaPlani/Sequias/Documentos/070313-Ane04Caudales%20 ambientales-V04.pdf>

Consejo Hídrico Federal, COHIFE. (2015). Seminario Internacional de Cambio Climático, Política Fiscal Ambiental y Caudales Ambientales: Desafíos y

oportunidades para las energías Sostenibles en América Latina. Prensa COHIFE. Consultado de: <http://www.cohife.org/noticias/s38/seminario-internacional-cambio-climatico-politica-fiscal-ambiental-y-caudales-ambientales>

Consuegra, M. (2013). Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (qe), resultados y posibles consecuencias. Tesis de Posgrado. Escuela de Ingeniería de Posgrado Julio Garavito. Consultado de: <http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/75/1/DOCUMENTO%20-%20FINAL.pdf>

Corona, G. y González, E. (2014). El “mar Aral” argentino: Breve historia de las lagunas de Guanacache. Documento de blog en línea. Consultado de: <https://animalderuta.com/2014/09/15/el-mar-aral-argentino-breve-historia-de-las-lagunas-de-guanacache/>

Del Pilar, A. y Corradine, M. (2014). Estimación del caudal ecológico por los métodos 7Q10, Q95% y los factores de reducción del 25 % en el río Ocoa, a partir de la generación de caudales diarios utilizando el modelo agregado de tanques. Especialización en Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C. Consultado de: <http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2100/1/Estimaci%C3%B3n%20de%20caudal%20ecol%C3%B3gico.pdf>

Diario de Cuyo (2013). En 5 horas bajó por la Quebrada de la Flecha un millón de m³. Redacción Diario De Cuyo. Consultado de: <https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/En-5-horas-bajo-por-la-Quebrada-de-la-Flecha-un-millon-de-m3-20130207-0024.html>

Díez, J. (2000). Metodologías para la estimación de caudales ecológicos. Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias.

Dyson, M. Bergkamp, G. y Scanlon, J. (2003). Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. Tr. José María Blanch. San José, C.R.: UICN-ORMA.

Emprendimientos Energéticos Binacionales S.A., EBISA. (2017). Aprovechamientos hidroeléctricos del río Santa Cruz. Estudio de impacto ambiental. Capítulo 4 – línea de base ambiental. Consultado de: <http://saludsantacruz.gob.ar/secretariadeambiente/wp-content/uploads/2017/11/4.2.4-%E2%80%93-HIDROLOG%C3%8DA-e-HIDROSEDIMENTOLOG%C3%8DA.pdf>

Honorable Cámara de Diputados de la Nación Argentina, HCDN. (2017). REGIMEN DE GESTION AMBIENTAL DE AGUAS - LEY 25688 -. MODIFICACION DEL ARTÍCULO 7°, SOBRE FUNCIONES DE LA AUTORIDAD DE APLICACION, E INCORPORACION DE UN ANEXO. Fecha: 20/04/2017; Expediente 1842-D-2017. Consultado de: <https://www.hcdn.gob.ar/proyectos/proyecto.jsp?exp=1842-D-2017>

Huguenin, C. (2017). Caudal ecológico en el mundo y en Costa Rica. Conference Paper. Consultado de: <https://www.researchgate.net/publication/320021154>

International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN. (2003). Flow. The essentials of environmental flows. IUCN Publications Services Unit. Consultado de: http://www.ecosystemeconomics.com/Resources_files/FLOW.pdf

Lowry, J. (2007). La utilización de programas de SIG de bajo costo para el inventario, la evaluación y el monitoreo de humedales. Informes Técnicos Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Gland, Suiza. Consultado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/lib_rtr02_s.pdf

Lozano, G. Gómez, J. Triviño, H. Rodríguez, C. Monsalve, E. y García, P. (2011). Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos e hidráulicos para la UMC Río Quindío. Convenio Interadministrativo N° 027 de noviembre 10 de 2010. Corporación Autónoma Regional del Quindío. Armenia, Colombia. Consultado de: https://www.crg.gov.co/2020/Documentos/Estimacion_Caudales_Ecologicos_UMC_Rio_Quindio.pdf

Minervini, M. y López, M. (2012). Lagunas del desierto. El valor de la naturaleza oculto en la identidad de su gente. Manual educativo ambiental de las lagunas de Guanacache, del Desaguadero y del Bebedero. Ramsar. Editorial APN. Argentina. Consultado de: https://issuu.com/sebapuechagut/docs/manual_ramsar_web1

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2017). Humedales. Documento web. Consultado de: <http://ambiente.gob.ar/humedales/humedales/>

Organización Meteorológica Mundial, OMM. (2006). Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros. OMM N°-1006. Consultado de: http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_drought_monitoring_early_warning_es_2006.pdf

Palau, A. (1994). Los mal llamados caudales “ecológicos”. Bases para una propuesta de cálculo. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 28(2), 84-95.

Pantoja, N. (2017). Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos, hidráulicos y ecológicos en la quebrada El Conejo (Mococa Putumayo). Universidad Pontificia Javeriana. Consultado de: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21157/PantojaValenciaNatalia2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ramsar. (2015a). Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes. Nota Informativa Ramsar 7. Convención sobre los humedales Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Consultado de: <http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn7s.pdf>

Ramsar. (2015b). Humedales: fuente de medios de vida sostenibles. Nota Informativa Ramsar 7. Convención sobre los humedales Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Consultado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/fs_7_livelihoods_esp_v1-1.pdf

Ramsar. (2015c). Mantener las turberas húmedas para un futuro mejor. Nota Informativa Ramsar 8. Convención sobre los humedales Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Consultado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/fs_8_peatlands_es_v1.pdf

Ramsar. (2015d). Humedales: una protección natural frente a los desastres. Nota Informativa Ramsar 9. Convención sobre los humedales Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Consultado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/fs_9_drr_esp_30j.pdf

Ramsar. (2016). Introducción a la convención sobre los humedales. Manual de la convención de Ramsar. 5ta edición. Subserie I: Manual 1 Cooperación internacional sobre los humedales. Consultado de: http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvention_s_final.pdf

Singh, S. Pahlow, M. Booker, D. Shankar, U. y Chamorro, A. (2018). Towards baseflow index characterisation at national scale in New Zealand, Journal of Hydrology. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.025>

Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, SEIA. (2016). Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA. Gobierno de Chile. Consultado de: http://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2016/guia_caudal_ambiental.pdf

Sosa, H. (2012). Restauración y conservación del Sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Fundación para la Conservación y el uso Sustentable de los Humedales. Oficina de Wetlands International en Argentina.

Sosa, H. Vaquer, G. Vallvé, S y Márquez, J. (1999). Ficha Técnica Lagunas de Guanacache. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. Consultado de: http://www.geocities.ws/guanacaches/sitio_ramsar_guanacache.html

Tharme, R. (2003). A global perspective on environmental flow assessment; emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. River Research Applications. 19:397 – 441.

The Nature Conservancy, (2011). Manual del usuario de Indicadores de Alteración Hidrológica, Versión 7.1. Consultado de: <https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/indicators-hydrologic-alt.aspx>

UNESCO, (2014). Qué son los Caudales Ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay. PHI-VIII / Documento Técnico N° 34, 29 pp.

World Wide Life, WWF. (2018). Glosario ambiental: ¿Qué es el ‘pulso de inundación’? Consultado de: <https://www.wwf.org.co/?333773/Glosario-ambiental-Que-es-el-pulso-de-inundacion#:~:text=Se%20trata%20de%20un%20proceso,conocidos%20como%20cresta%20y%20valle.>

Capítulo VI

PROPUESTA DE AJUSTE A LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAUDALES AMBIENTALES

INTRODUCCIÓN

Las metodologías de cálculo de caudales ambientales analizadas en el Capítulo V se basan en la determinación de escorrentías a partir de registros hidrológicos e históricos. Utilizando las series de tiempo de caudales, los distintos métodos establecen una proporción de agua a escurrir con fines ambientales. Dichas metodologías, como los Indicadores de Alteración Hidrológica (The Nature Conservancy, 2011) y otros citados en el capítulo anterior, suponen implícitamente que los objetivos ambientales (p. ej., conservación de humedales) se encuentran próximos a la estación hidrométrica sobre la que los caudales ambientales fueron calculados. Es decir, los métodos no consideran explícitamente las distancias entre la fuente de información hidrológica y el sitio en el cual se desea calcular el caudal ambiental.

En trayectos cortos, de pocos kilómetros, los caudales ambientales calculados serían válidos para la zona ecológica objetivo. Sin embargo, en distancias largas, las pérdidas de agua a través del cauce y mediante evaporación e infiltración, podrían ser significativas y proporcionales a la longitud de éstos. Algunos autores como Gu y Deutschman (2001) exponen que las pérdidas de agua en un canal representan un componente importante dentro de la planificación hidrológica de una región, por lo que es recomendable su cuantificación. Dentro de su estudio, orientado a calcular las pérdidas de agua en el río Sheyenne (Estados Unidos) y de acuerdo con el método de balance hídrico, Healy (2010) encontró pérdidas que fueron registradas durante el verano (período lluvioso) de uno de los años estudiados (debido a la evaporación en cauce).

Por su parte, HydroPoint (2019) expresa que el viento, la evaporación y la escorrentía causan la pérdida de hasta un 50 % del agua entregada para usos exteriores, representado una pérdida significativa de los sistemas de irrigación. En este sentido, utilizan la evapotranspiración de referencia como lámina de pérdidas por unidades de superficie. En estos términos, Shwartz (2016) afirma que, en cauces aluviales de zonas áridas, la infiltración es la primera causa de atenuación de crecidas. Adicionalmente y mediante experimentación, autores como Lange (2005), indican que las pérdidas por infiltración y evaporación son mayores durante máximos de descargas, disminuyendo con pequeñas o medianas escorrentías. Esta afirmación, junto a la expuesta por Shwartz (2016), resulta una justificación adicional al mantenimiento constante de caudales ambientales.

Relacionado a los volúmenes evaporados o infiltrados, Costa et al. (2012) reconocen las pérdidas en cauce como importantes aportes en los intercambios

con el subsuelo y los ecosistemas riparios. Por tanto, no son pérdidas en sí mismas, sino parte del ciclo hidrológico natural. Sin embargo, el término “pérdidas” se propone porque los volúmenes infiltrados o evaporados en cauce, no son considerados dentro del cálculo de caudales ambientales y por tanto representan volúmenes de agua que no llegarán al sitio objetivo de los caudales ambientales.

En la región argentina de Cuyo, disminuir al mínimo las pérdidas de agua durante la conducción hacia las zonas de riego es fundamental. Por esta razón, algunos esfuerzos desde los entes gubernamentales se han enfocado en intentar lograr que el agua dotada llegue a su objetivo (Satlari y Hernández, 2011), aumentando su eficiencia desde los cercanos 40 a 50 % (el restante se pierde por evaporación e infiltración) (Álvarez et al., 2009, Prensa Gobierno de Mendoza, 2019). Sin embargo, los objetivos en la zona son agrícolas, por lo que no existe un compromiso directo en permitir que una parte de los caudales alcance a los humedales del sitio Ramsar.

Dada la importancia económica de los oasis para la región, las pérdidas de agua en la conducción a los cultivos se deducen como pérdidas económicas para la zona. Sin embargo, las pérdidas naturales que pueden generarse desde los cauces de los ríos no representan un problema mayor, ya que en muchos casos y en la mayor parte del tiempo, el agua no fluye salvo durante excepcionales pulsos de crecidas. En este sentido, organismos educativos de la región, como la DGE (2006), explican la situación como un hecho aparentemente irremediable. Desde esta institución citan:

“La gran cantidad de agua derivada hacia los mencionados canales, la permeabilidad del suelo, las escasas precipitaciones y la fuerte evaporación hacen que el río pierda progresivamente su caudal y sólo en años hidrológicos ricos llegue al complejo lagunar de Guanacache, en el noreste de la provincia, para luego convertirse en afluente del río San Juan y con él llegar hasta el Desaguadero”

Asimismo, mapas oficiales (como el derivado del IGN, 2016 en la Figura 6.1), ya reflejan lo que en la realidad hidrográfica de la región es un hecho de hace años. Es decir, expresan la intermitencia de ríos (como el Mendoza y Tunuyán) varios kilómetros antes de la desembocadura de sus cauces sobre las zonas bajas del sitio Ramsar. Esto es el reflejo oficial de la interacción entre la oferta y demanda de agua en la región, para perjuicio de los humedales aguas abajo. Asimismo, la intermitencia de flujos explica que no existen caudales continuos, por lo que el inicio de estas interrupciones también expresa que las pérdidas por infiltración y evaporación son mayores que los caudales circulantes por los ríos mencionados en dichas zonas.

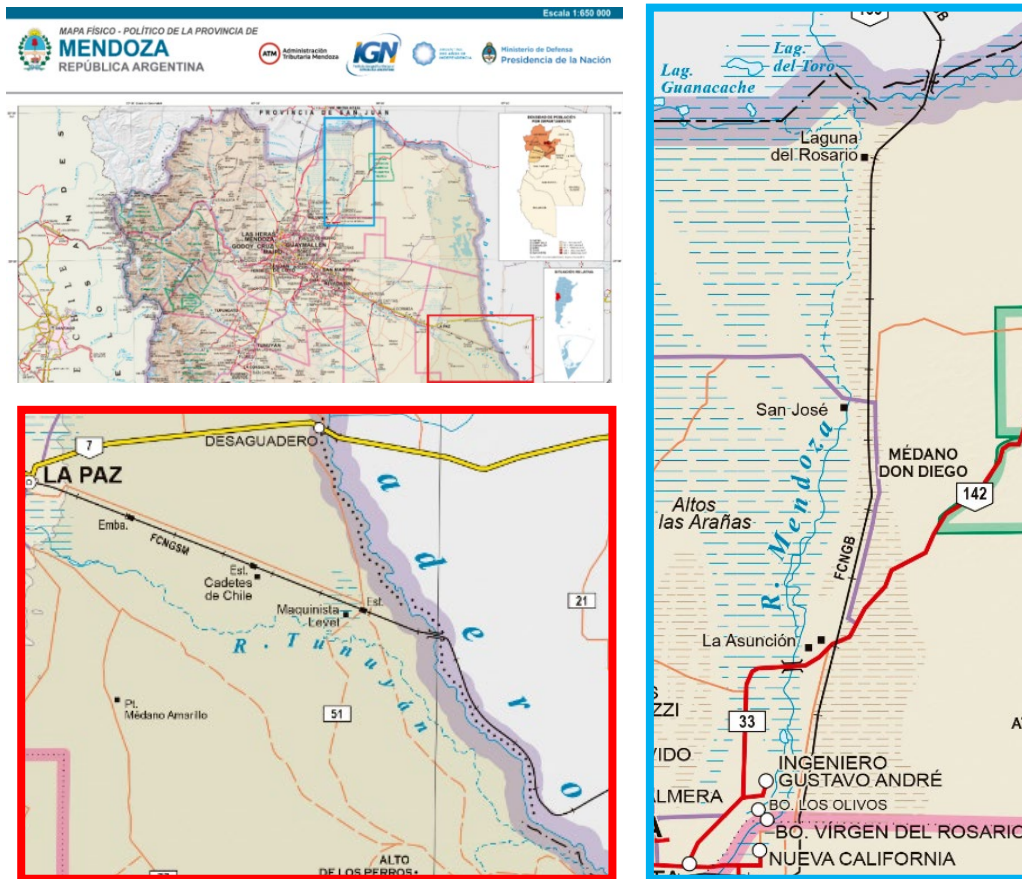


Figura 6. 1. Mapa físico – político oficial de la Provincia de Mendoza. Los rectángulos rojo y azul en el mapa superior izquierdo hacen referencia a las zonas donde los ríos Tunuyán y Mendoza se vuelven intermitentes (líneas azules discontinuas), respectivamente. Modificado de IGN (2016).

En vista de tal situación, el objetivo del presente capítulo es proponer un ajuste a las metodologías de caudales ambientales, el cual permita incluir las pérdidas en el cauce generadas por la infiltración y la evapotranspiración. Dicho ajuste se realiza sobre los caudales ambientales calculados en las estaciones del río Mendoza en Guido (MEG), río Tunuyán en Tunuyán – Valle de Uco (TVU) y San Juan en San Juan km 101 (SJ1) (Figura 6.2).

El ajuste permitirá sobreestimar los cálculos de caudales ambientales aguas arriba (estaciones hidrométricas), con el fin de que a lo largo de los trayectos de los ríos hasta el sitio Ramsar, las pérdidas naturales por infiltración y evaporación no afecten la afluencia de caudales estimados hacia el humedal del sitio Ramsar de estudio.

METODOLOGÍA

Propuesta de ajuste para el cálculo de caudales ambientales

La determinación de caudales ambientales establece un flujo de agua que debería escurrir por el canal. En términos generales, se trata de un caudal hipotético y potencial de implementar, siempre en función de un objetivo. Los

objetivos de un caudal ambiental pueden estar inmediatamente aguas abajo de la estación o sitio donde se calcularon, o muy alejados del mismo. Dichos objetivos pueden ser de origen natural (p. ej., humedales, lagos, franjas riparias de interés, reservas de biósfera, parques nacionales u otros espacios protegidos), o artificial (p. ej., abastecimiento de comunidades indígenas y comunidades de ubicación remota, zonas de riego con fines conservacionistas, entre otros).

Para el sitio Ramsar (Figura 6.2) y desde las estaciones hidrométricas de análisis, los canales de los ríos aportantes tienen longitudes que oscilan entre los 137,3 km (Mendoza), 173,2 km (San Juan) y 274,4 km (Tunuyán). Estas distancias implican un largo recorrido del agua sobre los cauces, desde que es determinada como caudal ambiental en las estaciones SJ1, MEG y TVU (con cuencas de aporte de 18348, 8180 y 2380 km², respectivamente), hasta su afluencia al sitio Ramsar (objetivo ambiental). Los caudales ambientales calculados, son aplicables para situaciones donde el objetivo ambiental esté cerca o relativamente cercano al sitio sobre los que se calcularon. Sin embargo, al estar alejados, podrían volverse significativas las pérdidas naturales de agua, como ya se ha expresado, por evapotranspiración potencial e infiltración. Mediante una revisión bibliográfica, los métodos consultados (p. ej., revisados, calculados y expuestos en el capítulo anterior) de origen hidrológico no consideran las pérdidas de agua por evapotranspiración potencial e infiltración, así como tampoco un ajuste a las metodologías para compensarlas.

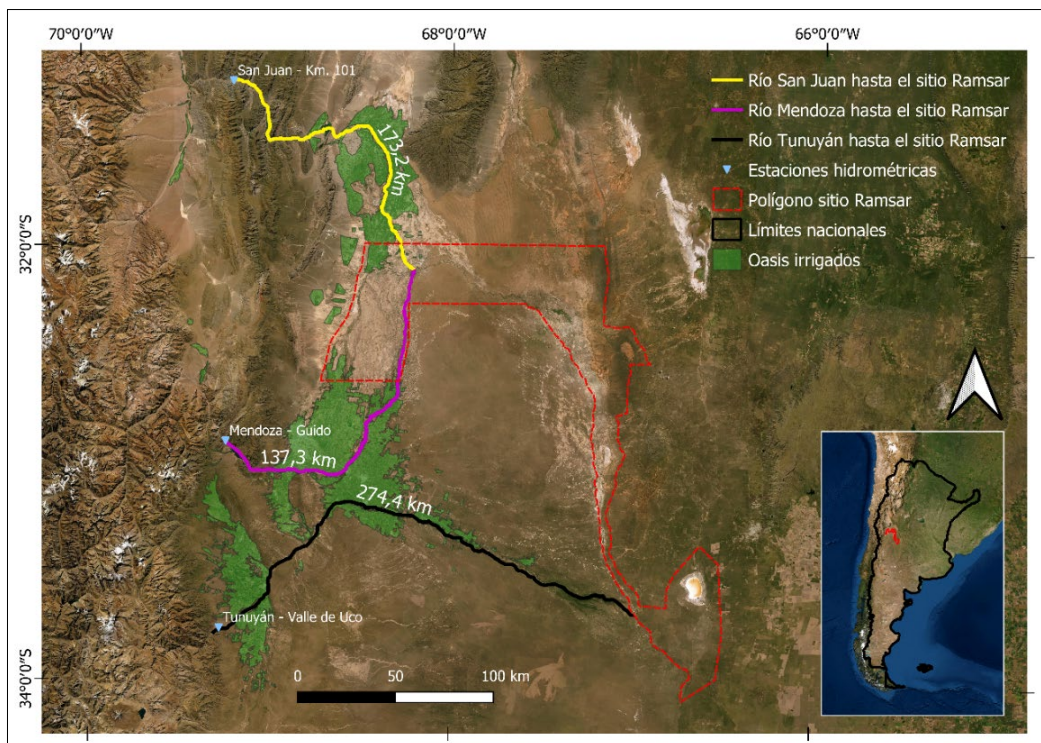


Figura 6. 2. Longitudes (km) de canales de ríos aportantes al sitio Ramsar.

De un modo diferente a otras situaciones en el mundo, en la Figura 6.2 se observa cómo el sitio Ramsar y las estaciones hidrométricas están separadas por distancias promedio de 200 km. Sobre dichos tramos, se ubican los aprovechamientos humanos (ciudades y oasis agrícolas), dejando al sitio Ramsar como un espacio de desagüe final, sin mayor relevancia económica.

Debido a los argumentos anteriores y de acuerdo con la posición alejada del objetivo ambiental (p. ej., sitio Ramsar) de las fuentes de cálculo de caudales ambientales, se propuso realizar un ajuste en función de las pérdidas por evapotranspiración potencial e infiltración en cauce (ecuación [6.1]).

$$Q_{amb;mod} = Q_{amb} + (I + E) \quad [6.1]$$

Donde, $Q_{amb;mod}$: caudal ambiental modificado; Q_{amb} : caudal ambiental; I : infiltración en cauces; E : evapotranspiración potencial en cauces. Los valores de las variables en cuestión son operados en unidades volumétricas por mes. De esta forma, el caudal ambiental modificado o ajustado considerará las pérdidas naturales de agua. Lo anterior implica que los usos antrópicos de agua tendrán que ser menores, considerando la restricción dada por las pérdidas naturales. Cabe destacar que, aunque la evaporación no afecta por igual a un volumen de agua (en reposo o movimiento), para términos hipotéticos del estudio se consideró dicho volumen en reposo.

En este sentido, el ajuste en sí dependerá de las condiciones locales promedio de infiltración y evapotranspiración potencial. De esta forma y como se observa en la Figura 6.3, hipotéticamente, el ajuste se haría más pronunciado en meses donde la evapotranspiración es más elevada (verano). Por tanto, se recomienda que dicha modificación sea ajustada a las condiciones locales y de cada río en cuestión. Dado que en algunos casos los datos de infiltración y evapotranspiración pueden estar expresados en lámina de agua, al ser contrastados por el área del cauce, se recomienda usar volúmenes de agua.

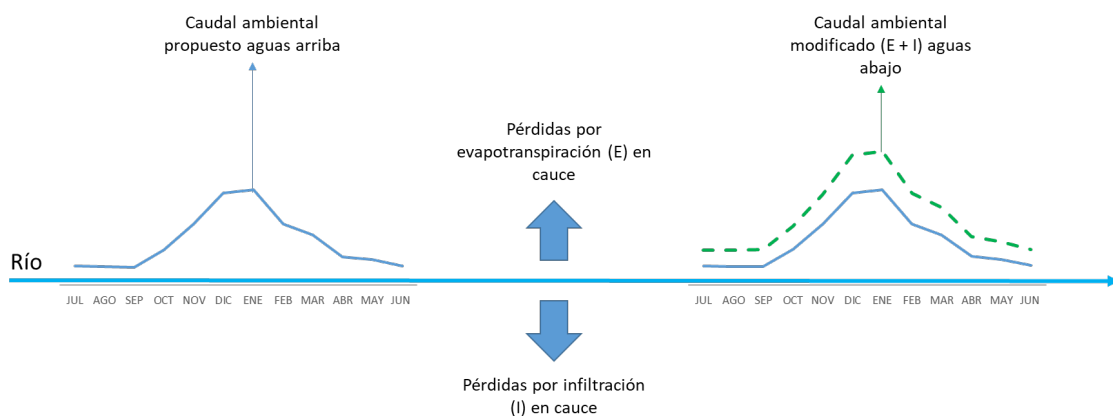


Figura 6. 3. Esquema de modificación propuesta a los caudales ambientales de origen hidrológico.

Mediante el ajuste propuesto, los caudales ambientales calculados en el capítulo anterior de acuerdo con los métodos de Caudal de Mantenimiento, Propuesta de Reforma de Ley argentina 25688 y del Programa de Recursos de las Grandes Llanuras Septentrionales (NGPRP), se modifican de acuerdo con la aplicación de la ecuación [6.1]. En dicha ecuación, los parámetros de evapotranspiración potencial fueron obtenidos para cada mes del año de acuerdo con los resultados hallados en el capítulo III. Se utilizó el balance hídrico anual de Thornthwaite 1993-2014 y se calculó para las estaciones ubicadas aguas abajo de MEG, SJ1 y TVU. La utilización de la evapotranspiración potencial sobre la real radica en la naturaleza hipotética del ejemplo (considerando que los cauces presentan agua superficial).

Posteriormente, se calculó el área promedio del cauce y franjas riparias contiguas de cada uno de los tramos de los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán, desde las estaciones SJ1, MEG y TVU respectivamente, hasta su afluencia al sitio Ramsar. Dichas superficies fueron medidas de acuerdo con las áreas de los cauces de los ríos mencionados junto a sus franjas riparias inmediatas (Figura 6.4). Su delimitación se realizó en función de la visualización del NDVI basado en una imagen Landsat 7 (código de Google Earth Engine: 'LANDSAT/LE07/C01/T1_32DAY_NDVI' con resolución espacial de 30 m y temporal de 32 días) e imágenes satelitales Landsat/Copernicus mediante Google Earth Pro (Google LLC, 2021).

Con el objetivo de resaltar la delimitación de los cauces y franjas riparias, el rango temporal escogido fue entre el 7 de febrero y el 15 de marzo de 2013, ya que incluye un evento regional que representó una pequeña inundación (MEG) y un pulso de caudal alto (SJ1 y TVU), analizado al final del capítulo V. Los valores de evapotranspiración potencial en lámina (mm), al ser multiplicados por el área promedio de los cauces, establece un volumen de agua evapotranspirado mensual, el cual puede ser también expresado en m³/s. Si bien la totalidad del ancho de los cauces no es inundado, se considera (para efectos de la ETP) por tratarse de la franja riparia húmeda y vegetada a las márgenes del flujo de escorrentía.

Respecto a la infiltración en cauce y de acuerdo con Tecnoriego (s/f), los valores para la cuenca del río Mendoza y del río Tunuyán Inferior, son 8 y 1,8 m³/s respectivamente, los cuales y en el mismo orden, representan un 16 % y un 6 % de sus caudales medios anuales. Cabe resaltar que, si bien los datos de Tecnoriego mencionados fueron los únicos encontrados dentro de la revisión de antecedentes, carecen de estimaciones para la cuenca del río San Juan. Asimismo, dichos datos no presentan referencias acerca de las metodologías utilizadas para su estimación.

Aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS

En vista de lo anterior y dado el carácter estimativo de la infiltración en cauce, se procedió a modelar esta variable utilizando el software HEC-HMS 4.9 (US Army

Corps of Engineers, 2021). Mediante dicho programa, se modeló el área de los cauces y zonas riparias inmediatas de los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán, desde las estaciones SJ1, MEG y TVU respectivamente, hasta sus desembocaduras dentro del sitio Ramsar (Figura 6.4). Las características de las cuencas utilizadas para la ejecución del modelo se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6. 1. Características morfométricas utilizadas para la ejecución del modelo hidrológico.

Río	Área cauces (km ²)	Longitud cauce (km)	Pendiente cauce (m/m)	Tiempo de concentración Tc (horas)*
San Juan	213,7	173,2	0,0040	29,4
Mendoza	225,8	137,3	0,0064	20,4
Tunuyán	216,4	274,4	0,0028	48,0

* Tc calculado de acuerdo con la fórmula de Kirpich (Vich, 1999).

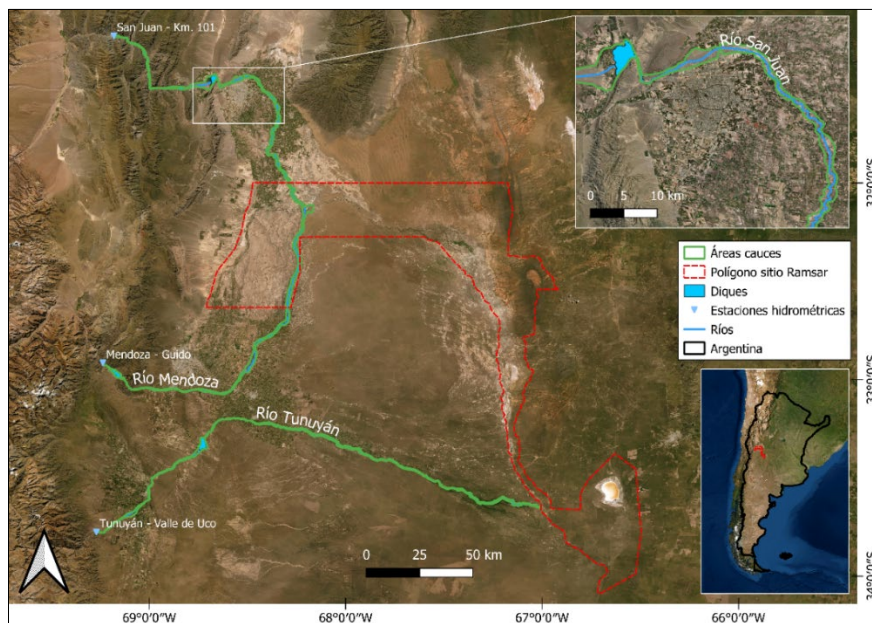


Figura 6. 4. Áreas sobre cauces y franjas riparias de los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán.

Los parámetros utilizados dentro del modelo se mencionan a continuación.:

Método de pérdidas: número de curva (CN) SCS. Dado que los cauces presentan homogeneidad por tratarse de lechos fluviales de una misma región, se consideró un CN = 30 con humedad antecedente tipo II (asociado a un grupo hidrológico de suelos tipo A, con elevada infiltración y con escasa a nula cobertura vegetal). Si los modelos de lluvia-escorrentía y los números de curva se utilizan para los análisis en cuencas vertientes, para el caso de este Estudio, los cauces fueron considerados como “cuencas”, con el fin de poder modelar una infiltración hipotética (dada la ausencia de datos medidos).

Método de transformación: hidrograma unitario SCS.

De esta forma, se modeló un hidrograma hipotético, cuya escurriencia total generada se contrastó con las pérdidas por infiltración (en este caso, de cada cauce). El contraste se obtuvo mediante la ecuación [6.2]:

[6.2]

$$\text{Infiltración en cauce (\%)} = \left(\frac{\sum \text{pérdidas en cauce (m}^3/\text{s)}}{\sum \text{volumen de escurriencia mensual (m}^3/\text{s)}} \right) * 100$$

Dado que los datos de infiltración ya representan las pérdidas en cauce de los ríos mencionados, éstos se transformaron a volumen mensual, con el fin de ser sumados a las pérdidas mensuales de evapotranspiración y posteriormente a los valores mensuales de caudales ambientales (expresados en m³/s).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Posterior al proceso de obtención de valores de evapotranspiración potencial en cauces (ETP), se presentan los resultados para los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán, desde las estaciones SJ1, MEG y TVU respectivamente, hasta sus confluencias en el sitio Ramsar (Figura 6.5).

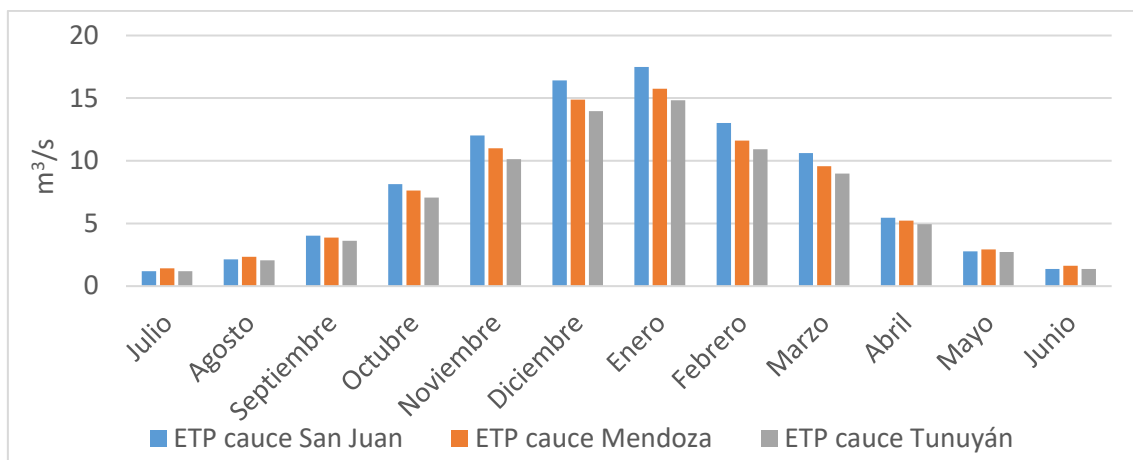


Figura 6. 5. Evapotranspiración potencial (caudal) sobre cauces y franjas riparias de los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán.

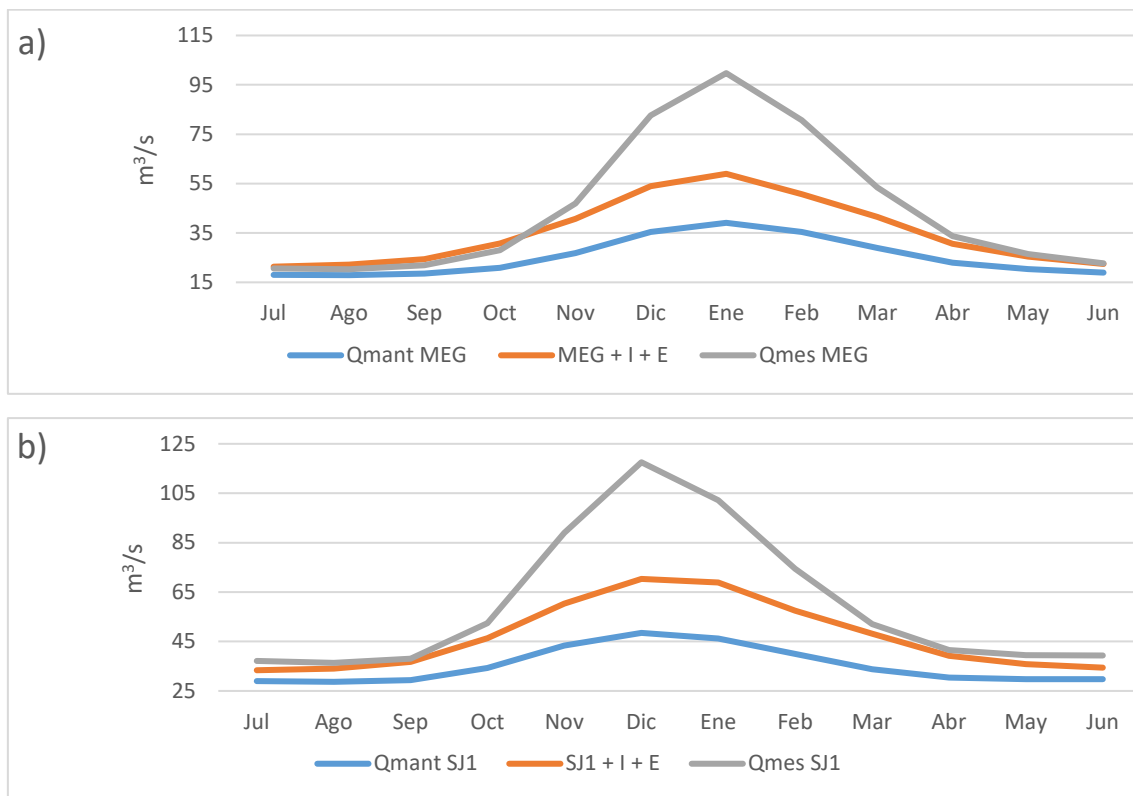
Los valores de ETP (llevados a caudal) son resultado de las condiciones climáticas regionales y de la superficie de los cauces considerados (lo cual puede llevar a una sobreestimación de las pérdidas). De esta forma, San Juan presenta las mayores estimaciones, seguido por Mendoza y Tunuyán. Las máximas y mínimas (enero – julio) coinciden con el flujo de radiación solar determinado por la estacionalidad anual. Sumado a las demandas evapotranspirativas, la infiltración en cauce (modelada bajo HEC-HMS 4.9) se manifiesta como un porcentaje de los caudales simulados y generados bajo una lluvia hipotética. En

este sentido, la importancia no radica en el caudal infiltrado, sino en el porcentaje respecto al hidrograma escurrido. De esta forma, la proporción infiltrada para los tres ríos considerada se muestra en la Tabla 6.2 (cuyos datos relativos son similares a los propuestos por Tecnoriego, s/f).

Tabla 6. 2. Porcentajes de infiltración en cauces.

Cauce río	Proporción (%)
San Juan	11,2
Mendoza	10,5
Tunuyán	11,1

A partir de la sumatoria mensual y proporcional de la infiltración (I) sobre el caudal mensual medio más la evapotranspiración mensual (E) (ecuación [6.1]), se obtuvieron los hidrogramas ajustados de las metodologías de Caudal de Mantenimiento (Figura 6.6, Tabla 6.3), propuesta de Ley 25688 (Figura 6.7, Tabla 6.4) y NGPRP (Figura 6.8, Tabla 6.5).



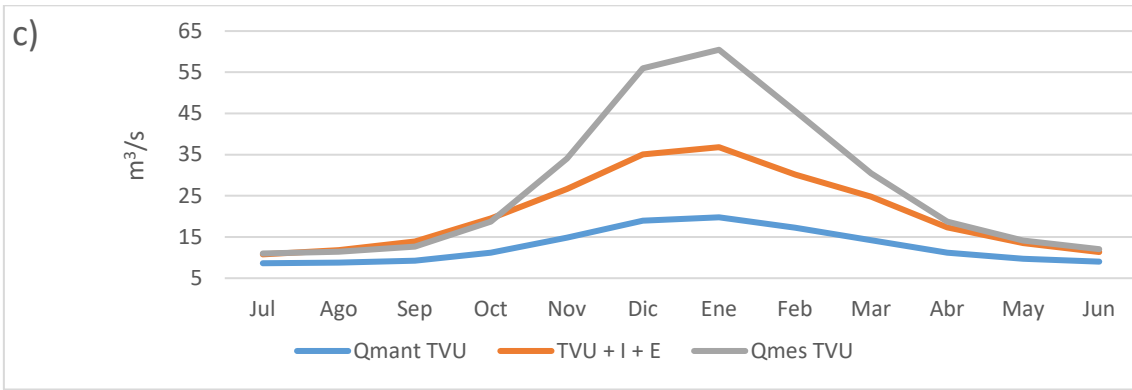


Figura 6. 6. Ajuste de los hidrogramas de Mendoza – Guido (MEG) (a), San Juan – km. 101 (SJ1) (b) y Tunuyán – Valle de Uco (TVU) (c) bajo la metodología del Caudal de Mantenimiento (Qmant). Las siglas I + E expresan la adición de los parámetros de infiltración y evaporación, respectivamente.

Tabla 6. 3. Diferencias porcentuales de volumen (área bajo la curva) entre la propuesta realizada ($\sum I + E$) y los hidrogramas calculados bajo el Caudal de Mantenimiento.

Cauce río	Proporción (%)
San Juan	33,6
Mendoza	39,5
Tunuyán	64,6

Los caudales ajustados (E + I) superan al hidrograma de caudales ambientales propuesto (Figura 6.6), con mínimos en julio y máximos en enero. En cuanto a las diferencias porcentuales (Tabla 6.3), San Juan y Mendoza se ubican entre 33 y 39 % respectivamente, mientras que el Tunuyán sobrepasa el 64 % (dado por la mayor longitud y superficie de cauce de este río). Durante los meses invernales, la propuesta (caudal de mantenimiento + I + E) es similar a la curva de Q_{mes} para los tres ríos considerados.

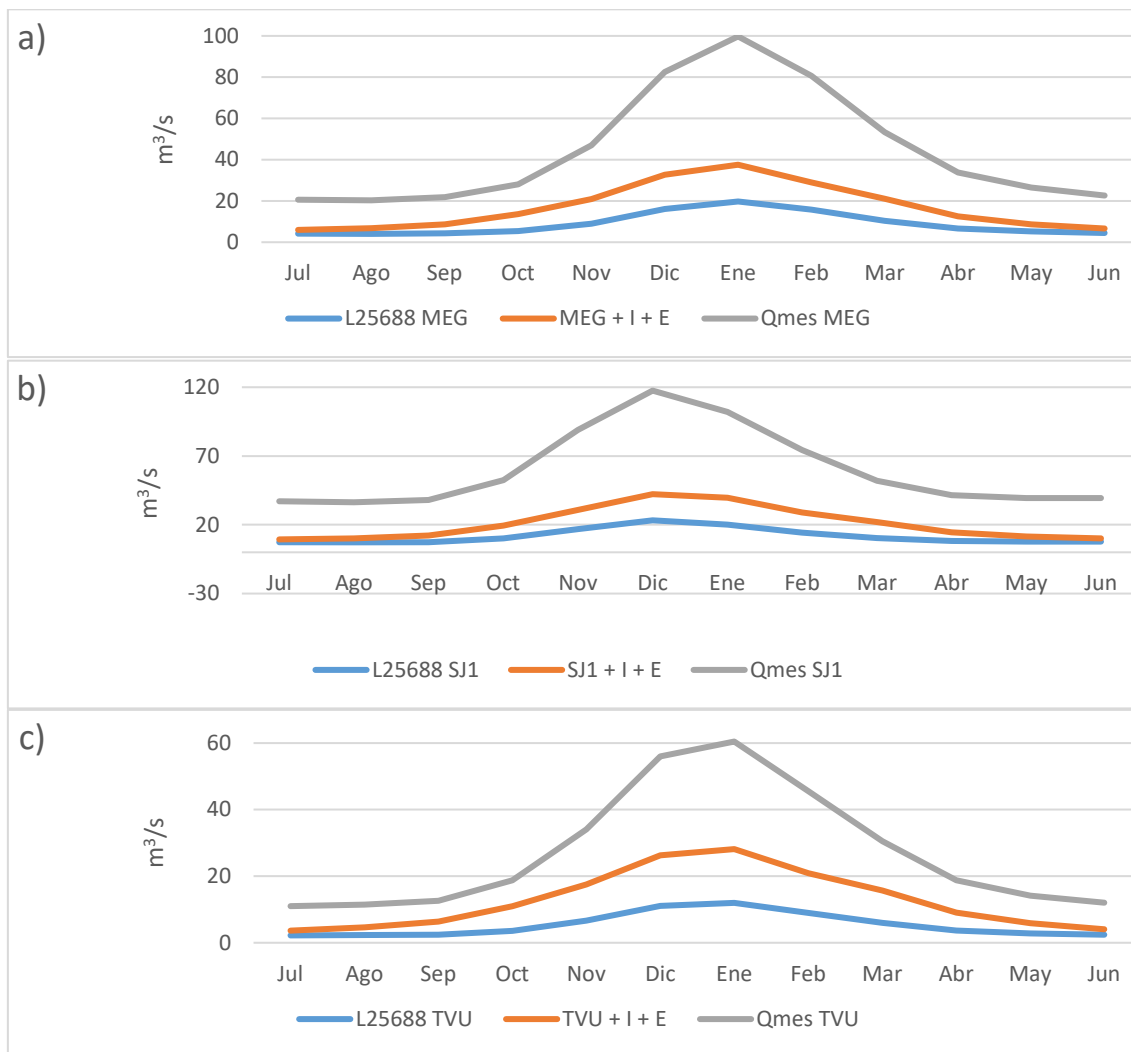


Figura 6. 7. Ajuste de los hidrogramas de Mendoza – Guido (MEG (a), San Juan – km. 101 (SJ1) (b) y Tunuyán – Valle de Uco (TVU) (c) bajo la metodología de la propuesta de modificación de la Ley argentina 25688 (L25688). Las siglas I + E expresan parámetros de infiltración y evaporación, respectivamente.

Tabla 6. 4. Diferencias porcentuales de volumen (área bajo la curva) entre la propuesta realizada ($\sum I + E$) y los hidrogramas calculados por la propuesta de modificación de la Ley 25688.

Cauce río	Proporción (%)
San Juan	78,5
Mendoza	94,1
Tunuyán	138,9

Para la propuesta de modificación de la Ley argentina 25688 (Figura 6.7), la estructura de los hidrogramas y sus ajustes son similares como se observa en la Figura 6.6. Las magnitudes responden a las características de la metodología de caudales ambientales empleada. Las diferencias porcentuales (Tabla 6.4), las sumatorias de I + E para los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán alcanzan los 78, 94 y 138 % de diferencia respecto a los hidrogramas arrojados por la metodología, respectivamente. El margen de diferencia entre los caudales mensuales y la propuesta (considerando este método) es superior a la observada

en el caudal de mantenimiento (Figura 6.6), por lo que existe un margen holgado entre los Q_{mes} y los caudales ambientales calculados (sin considerar otro tipo de demandas de origen humano).

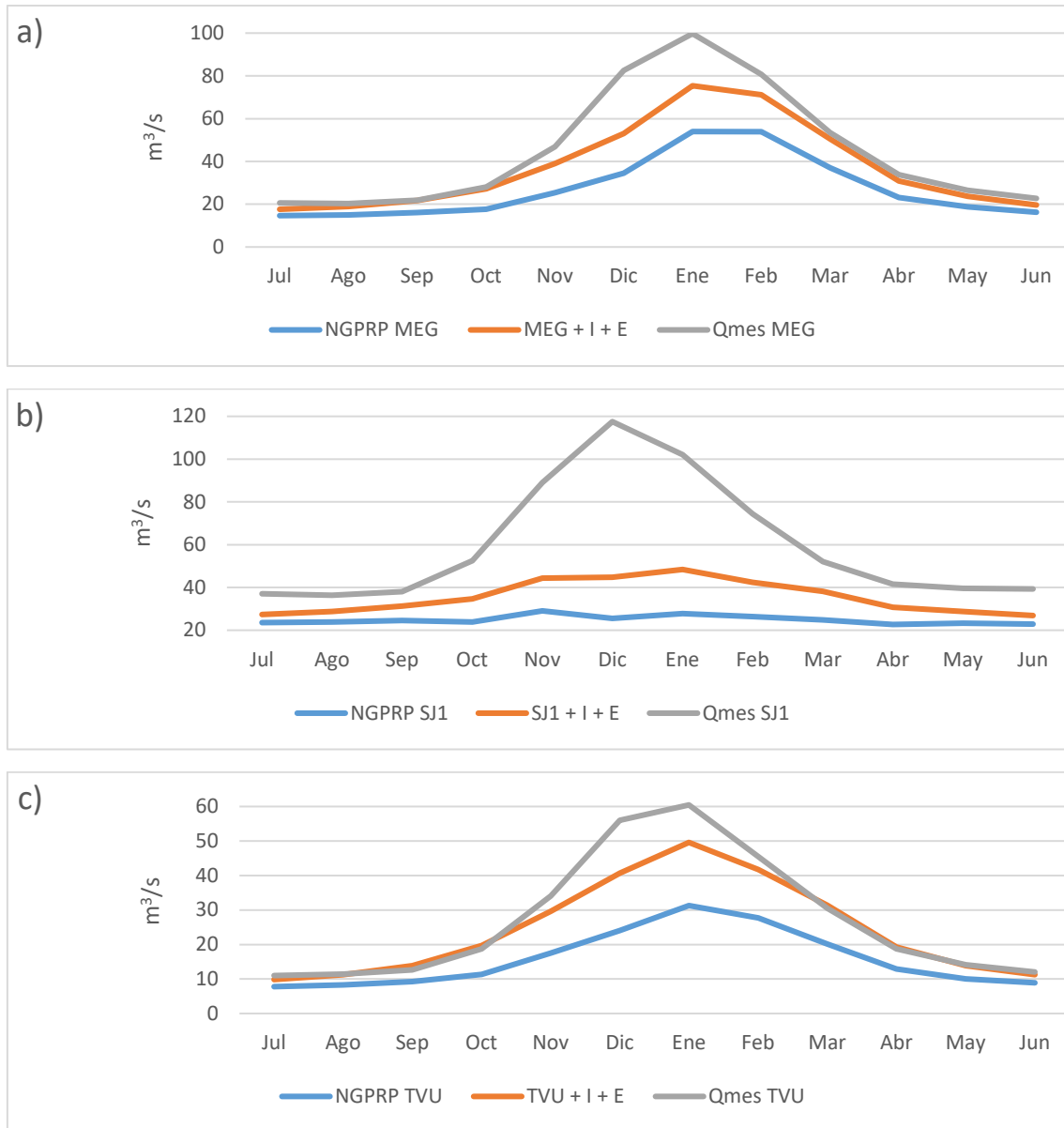


Figura 6. 8. Ajuste de los hidrogramas de Mendoza – Guido (MEG) (a), San Juan – km. 101 (SJ1) (b) y Tunuyán – Valle de Uco (TVU) (c) bajo la metodología de la NGPRP (Programa de Recursos de las Grandes Llanuras Septentrionales). Las siglas I + E expresan parámetros de infiltración y evaporación, respectivamente.

Tabla 6. 5. Diferencias porcentuales de volumen (área bajo la curva) entre la propuesta realizada ($\sum I + E$) y los hidrogramas calculados bajo la metodología de la NGPRP.

Cauce río	Proporción (%)
San Juan	42,9
Mendoza	37,4
Tunuyán	54,4

Como se muestra en la Tabla 6.5 y Figura 6.8, la máxima diferencia proporcional entre el hidrograma derivado del método de NGPRP y el ajuste realizado lo presenta el río Tunuyán, con un 54 %. San Juan y Mendoza presentan un 42 y 37 %, respectivamente. En este sentido y en promedio, esta metodología presenta las menores diferencias porcentuales respecto a las demás metodologías consideradas. Por su parte y similar al método del caudal de mantenimiento (Figura 6.6), los caudales ambientales propuestos (I + E) son similares a la curva de caudales mensuales durante meses invernales, por lo que el margen de uso del agua en estos meses se reduce.

CONCLUSIÓN

Los métodos de cálculo de caudales ambientales (utilizadas en el capítulo V) no consideran las pérdidas de agua derivadas de trayectos en cauce largos, por tanto, la propuesta del presente Capítulo se centró en exponer un ajuste que considere dichas pérdidas, para que el caudal ambiental realmente sirva para la gestión y mantenimiento de los sitios en estudio.

Tomando como referencia a las estaciones San Juan km. 101 (SJ1), Mendoza - Guido (MEG) y Tunuyán – Valle de Uco (TVU) sobre los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán, respectivamente, la propuesta se basó en el cálculo de evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite sobre la superficie del cauce entre las estaciones mencionadas y sus desembocaduras en el sitio Ramsar. Adicional a la evapotranspiración potencial, la infiltración fue modelada en los trayectos mediante el uso de HEC-HMS 4.9. De esta forma, la sumatoria de ambas pérdidas hídricas se adiciona a los hidrogramas de caudales ambientales, con el fin de sobreestimarlos y permitir que los caudales ambientales calculados en las estaciones puedan llegar al sitio Ramsar (luego que en los trayectos una porción sea evapotranspirada o infiltrada).

Bajo este concepto y para los tres métodos de caudales ambientales considerados, la sumatoria de las pérdidas a los hidrogramas supondría diferencias proporcionales que oscilan desde 33,6 % (San Juan – método del caudal de mantenimiento), hasta 138,9 % (Tunuyán – método de propuesta de modificación de la Ley argentina 25688).

Si bien las mayores diferencias porcentuales entre la propuesta y los caudales ambientales se atribuyen al proyecto de modificación de la Ley argentina 25688, mediante este método existe un mayor margen volumétrico respecto a las curvas de caudales medios mensuales de MEG, SJ1 y TVU. En este sentido, esta metodología presenta mayores posibilidades de aplicación en la región, tanto por razones ecológicas como económicas (uso del agua). Si bien la propuesta exige aún más agua de la calculada mediante los diferentes métodos de cálculo de caudales ambientales, permitiría lograr el objetivo de estos, pudiendo alcanzar así al objetivo ecológico para el cual fueron calculados (sitio Ramsar).

Se enfatiza que esta propuesta sólo es válida y significativa para aquellos caudales ambientales cuyos objetivos ecológicos se encuentren alejados de las

fuentes desde donde fueron calculados. De esta forma, se recomienda considerar dicho ajuste en caso de cauces con extensas longitudes. Para el caso de la zona de estudio, implementar caudales ambientales continuos y que alcancen el sitio Ramsar permitiría reducir las pérdidas por infiltración y evitar la magnitud de atenuación de crecidas (representadas como pulsos de importancia para los humedales).

Dado el carácter estimativo de algunos cálculos realizados por la ausencia de datos medidos (p. ej. evapotranspiración sobre flujos en régimen turbulento, modelado de infiltración en cauces), es recomendable realizar estudios detallados, con el fin de obtener los datos necesarios para aumentar la precisión de los resultados. Sin embargo, la similitud de los datos modelados de infiltración con Tecnoriego (s/f) y la lógica del modelo abstracto, indican la potencialidad de aplicar el modelo de ajuste al establecimiento de los caudales ambientales (en caso de que los objetivos ambientales estén muy alejados aguas abajo de las estaciones de medición).

Tanto la implementación de los caudales ambientales, como su ajuste (propuesto en este Capítulo), suponen un esfuerzo enorme para la planificación hídrica local y para las economías regionales. Bajo el argumento anterior, todo dependerá de la disposición de autoridades locales, el alcance de las economías, la disponibilidad del recurso hídrico y la voluntad para permitir que una parte de los caudales naturales puedan fluir y abastecer las demandas ambientales de las franjas riparias y zonas bajas (humedales).

REFERENCIAS

Álvarez, A. Drovandi, A. Hernández, J. Hernández, R. Martinis, N. Maza, J. Mirábile, C. Morábito, J. Salatino, S. y Vargas, A. (2009). Documento del Centro Regional Andino del Instituto Nacional del Agua (CRA-INA) sobre: El agua en Mendoza y su problemática ambiental. Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino. Consultado de: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ina-cra-aguayproblematica-ambien-mendoza.pdf>

Costa, A. Bronsert, A. y Araújo, J. (2012). A channel transmission losses model for different dryland rivers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1111–1135, 2012. Doi: <https://doi.org/10.5194/hess-16-1111-2012>

Dirección General de Escuelas, DGE. (2006). El comportamiento del agua en Mendoza. Gobierno de la Provincia de Mendoza. Consultado de: <https://www.mendoza.edu.ar/el-comportamiento-del-agua-en-mendoza/>

Google LLC. (2021). Google Earth Pro 7.3.4.8642 (64-bit). Consultado y descargado desde: <https://www.google.com/intl/es-419/earth/versions/>

Gu, R. y Deutschman, M. (2001). Hydrologic Assessment of Water Losses in River. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 127, Issue 1 (Febrero 2001). Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:1\(6\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:1(6))

Healy, R. (2010). Water-budget methods. USGS publication. Doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745.003>

HydroPoint. (2019). What is Water Budget | Formula for Calculation | MAWA. Blog publicado el 16 de diciembre de 2019. Consultado de: <https://www.hydropoint.com/blog/water-budget-formula/>

Instituto Geográfico Nacional, IGN. (2016). Mapa Físico – Político de la Provincia de Mendoza. República Argentina. Consultado de: https://www.ign.gob.ar/gallery-app/provincias/medium/mendoza_linea.jpg

Lange, J. (2005). Dynamics of transmission losses in a large arid stream channel. Journal of Hydrology. Volumen 306. Capítulo 1–4, 9. Páginas 112-126. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.016>

Prensa Gobierno de Mendoza. (2019). El 50% del agua de los mendocinos se pierde por riego a manto. Gobierno de la Provincia de Mendoza. Consultado de: <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/el-50-agua-de-los-mendocinos-se-pierde-por-riego-a-manto/>

Satlari, J. y Hernández, J. (2011). Infiltración y erosión: sus efectos sobre la red de canales a partir de la regulación del río Mendoza. Trabajo final integrador para aplicar al título de Especialista en Riego y Drenaje. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Consultado de: https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/4124/satlari2011.pdf

Schwartz, U. (2016). Factors affecting channel infiltration of floodwaters in Nahal Zin basin, Negev desert, Israel. Hydrological Processes. Volumen 30, Nº 20. Páginas 3704-3716. Doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.10826>

Tecnoriego. (s/f). HIDROGEOLOGÍA REGIONAL DE MENDOZA. Consultado de: <https://www.tecnoriegovalley.com.ar/uploads/hidrogeologia-mendoza-8048.pdf>

The Nature Conservancy, (2011). Manual del usuario de Indicadores de Alteración Hidrológica, Versión 7.1. Consultado de: <https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/indicators-hydrologic-alt.aspx>

Thornthwaite, W. y Mather, J. (1955). The water balance. Publications in Climatology, 8(1), 104-114.

US Army Corps of Engineers. (2021). Hydrologic Modelling System (HEC-HMS). Version 4.9. Date: 20Jan. 2022. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center. Consultado y descargado desde: www.hec.usace.army.mil

Vich, A. (1999). Aguas Continentales. Formas y Procesos. Manual de Aplicaciones Prácticas.

Capítulo VII

ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO REGIONAL INCLUYENDO EL FACTOR ANTRÓPICO

INTRODUCCIÓN

El balance hídrico representa uno de los temas de estudio fundamentales de la hidrología, y se enmarca en la ecuación general de balance hídrico (Gálvez, 2011; Velásquez-Restrepo y Poveda, 2019). Estos autores lo enmarcan como “*la ecuación diferencial de conservación de masa dentro de un volumen de control definido por una cuenca hidrográfica*”, la cual en términos genéricos y de agua en el sistema, se expresa como (Suescún y Alarcón, 2018):

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} + \text{Cambio en el Almacenamiento} \quad [7.1]$$

Bajo esta afirmación, el balance implica [7.1] que los factores considerados se adecúen a las características regionales de un lugar. De esta forma, las entradas de agua pueden estar representadas por precipitaciones y/o escurrimientos (superficiales/subsuperficiales), mientras que las salidas incluyen el total de escurrimientos, evaporación y evapotranspiración e infiltración (Gálvez, 2011).

Suescún y Alarcón (2018) expresan que “*el balance hídrico es fundamental para el conocimiento del afluente y su capacidad de abastecimiento a las poblaciones aledañas que se verán beneficiadas con el recurso*”. Asimismo, estos autores enfatizan en que su determinación brinda información acerca de la capacidad temporal y espacial de un sistema para satisfacer el ciclo del agua local. La forma en que el ciclo del agua existe en una determinada región determina en gran medida el alcance ecológico en la zona. De esta forma, el paisaje ecológico estará moldeado por la distribución temporal y espacial del agua. Bajo este concepto, los ingresos de agua son suficientes para mantener la biota local y eventualmente almacenar el recurso (Suescún y Alarcón, 2018).

Incorporando el consumo humano (incluyendo demandas residenciales, agrícolas o industriales) a la ecuación de balance hídrico, el factor de “Salidas” del sistema se agranda y comienza a sustraer agua de los excedentes en el almacenamiento o en caudales ambientales. Los desajustes en dicho balance podrían ocasionar (en casos extremos), que la mayoría de los ingresos de agua se destinen a satisfacer las demandas humanas, ocasionando un perjuicio a los ecosistemas privados del recurso hídrico.

En este sentido, algunos organismos de planificación de aguas (regionales y mundiales) recomiendan “*conocer el balance hídrico como herramienta para optimizar el uso del agua*” (UNESCO, 2006; Sáenz, 2014; UN, 2020; FAO, 2021). A escala de la región de estudio, organismos gubernamentales como el Departamento General de Irrigación (DGI - Mendoza) y la Dirección de Hidráulica (San Juan) publican periódicamente documentos relacionados al estado de los

balances hídricos de las cuencas involucradas entre las provincias de Mendoza y San Juan. Como ejemplo, el DGI propone objetivos técnicos (definición de oferta, demanda y escenarios), registrales (actualización del padrón de consumo), legales (normativas) y de acciones. El marco de esta institución se basa en interrogantes como: “¿está limitado el desarrollo en Mendoza?, ¿hay o no hay agua?, ¿alcanza para nuevos usuarios?, ¿cómo afecta el cambio climático?, ¿es susceptible de usos sucesivos?”.

La región árida cuyana donde se ubica el sitio Ramsar de estudio presenta una susceptibilidad natural frente a la escasa disponibilidad de agua. Sobre esta realidad, las actividades humanas posteriores a la colonización no han dejado de crecer, representando una de las regiones agrícolas productivas más importantes de Argentina. En la Figura 7.1 y de forma análoga, se enmarca la realidad del balance pre y post impacto antrópico, versus la situación de equilibrio ideal a obtener.

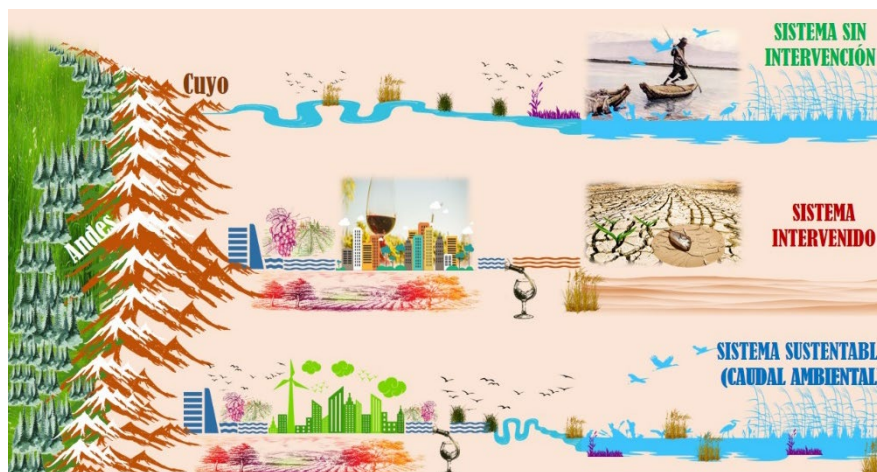


Figura 7. 1. Analogía del balance hídrico sin intervención, intervenido y sustentable para el sitio Ramsar de estudio y sus zonas de oasis aguas arriba. Fuente: Bastidas (2021).

La analogía pictórica de la Figura 7.1, orientada de norte a sur, muestra la cordillera andina al oeste, del cual se desprenden las escorrentías al este y bajo tres escenarios:

1. El sistema sin intervención, con los ríos fluyendo hacia los humedales aguas abajo y satisfaciendo las demandas naturales y de los antiguos pueblos huarpes.
2. El sistema intervenido o actual, con los ríos represados y con el recurso destinándose al sostenimiento agrícola y urbano, dejando escasez hídrica aguas abajo.
3. El sistema sustentable o ideal, bajo implementación del caudal ambiental, permitiendo la coexistencia balanceada entre las actividades humanas y las ecológicas.

Este último escenario podría parecer una utopía, dado que el recurso hídrico es finito, sin embargo, el escenario de balance equilibrado a lograr yace sobre la implementación de una gestión de recursos hídricos eficiente, generalmente

cimentado sobre marcos legales determinados. Llop et al. (2013) establecen que, en términos legales locales, la Ley N° 8051/2009 de Ordenamiento Territorial y Usos del Suelo de Mendoza, destaca el rol de la disponibilidad de agua para garantizar un uso equilibrado. Asimismo, subrayan el papel de la Ley General de Aguas (1984) y la Constitución Provincial (1916) por su importancia en promover la verificación continua de la existencia de excedentes hídricos.

Estos autores (Llop et al., 2013) consideran al balance hídrico como un elemento para el manejo de la sustentabilidad del recurso hídrico y del suelo, por lo que, con frecuencia son impulsadas reformas de Ley para actualizar los documentos técnicos vinculados a la regulación y análisis de los recursos hídricos, así como al establecimiento de caudales ecológicos dentro del sistema hidrológico (Legislatura de Mendoza, 2021). Dentro de algunos de los resultados del último informe sobre balances hídricos en las cuencas de la provincia de Mendoza, el DGI (2016) presenta un gráfico alusivo a la oferta y demanda de agua del río Mendoza (Figura 7.2).



Figura 7. 2. Resultado del balance hídrico del río Mendoza. El eje Y está expresado en caudales (m^3/s). Fuente: DGI (2016).

Considerando el balance hídrico medio anual, las demandas totales superan a la curva de oferta en gran parte del año promedio (Figura 7.2). Cabe destacar que, dentro de las demandas el DGI sólo considera a las demandas agrícolas y el abastecimiento de población. Lo anterior implica que, en términos ecológicos, el balance es negativo.

Esta situación forma parte de la justificación del objetivo general del presente capítulo, el cual se basa en estudiar el balance hídrico regional en términos de las demandas ambientales. El análisis de la situación resultante permite establecer el estado de la oferta y demanda de los recursos hídricos en la zona (incluyendo a las cuencas aportantes al sitio Ramsar: San Juan, Mendoza y Tunuyán), así como también observar los posibles escenarios futuros y de remediación de acuerdo con los objetivos para el establecimiento de los caudales ambientales (objetivo principal de esta Tesis de investigación).

METODOLOGÍA

Se exploró la relación sociedad-naturaleza en la región analizando cuantitativamente el balance hídrico de la zona. El objetivo de esta sección es comprobar si los volúmenes de oferta de agua (período 1971 – 2018) son suficientes para satisfacer las demandas antrópicas y ambientales (incluyendo las pérdidas por evapotranspiración e infiltración en cauces calculadas previamente. Se consideraron los volúmenes destinados al riego y uso residencial en los oasis de San Juan, Mendoza y Tunuyán (demandas hídricas). En la siguiente expresión, las diferencias entre la oferta (Q) y las demandas ($P_C + (D_A + D_R)$) establecen un balance en función del caudal ambiental (ecuación [7.2]):

$$Q_{amb} = Q - P_C - (D_A + D_R + D_I) \quad [7.2]$$

Donde, Q_{amb} : demanda ambiental; P_C : pérdidas en cauce; D_A : demanda agrícola bruta; D_R : demanda residencial bruta; D_I : demanda industrial. Las demandas industriales no están declaradas para la cuenca de los ríos Tunuyán y San Juan; para el caso del río Mendoza y de acuerdo con el DGI (2016), estas demandas representan usos no consuntivos. Las demandas brutas se refieren a la dotación inicial de agua al sector objetivo, sin considerar la eficiencia o pérdidas dentro de los sistemas involucrados.

En la expresión anterior y de acuerdo con objetivos ecológicos y humanos, los componentes de demandas ambientales, pérdidas en cauce y demandas residenciales son técnicamente inflexibles frente a modificaciones forzadas para disminuir la demanda del recurso. De esta forma, si la sumatoria de las demandas es mayor que la oferta, los volúmenes a reducir tendrían que partir de las demandas de riego e industrial. Esto comprometería a la matriz económica de la región sobre la ecológica o humana.

El balance mensual se realizó para cada río, tomando como oferta los caudales medios mensuales en las estaciones SJ1, MEG y TVU y en el período 1971 – 2018. Como demandas, se consideraron los caudales ambientales del método más conservador de los analizados con anterioridad (propuesta de Ley argentina N° 25688), así como también las pérdidas en cauce calculadas y las demandas de riego y residenciales para las cuencas de los ríos San Juan (Pugliese et al. 2014, Gobierno de San Juan, 2017), Mendoza y Tunuyán (DGI, 2016).

RESULTADOS

Aplicando lo indicado en la metodología, los volúmenes del balance anual medio (hm^3) para cada cuenca se presentan en la Tabla 7.1 y Figura 7.3.

Tabla 7. 1. Volúmenes anuales (hm^3) de demandas y oferta de agua para las cuencas de los ríos Mendoza, San Juan y Tunuyán. Los volúmenes de caudal ambiental y pérdidas en cauce fueron estimados en los capítulos V y VI de esta Tesis. Las demandas agrícolas y residenciales fueron extraídas de los balances hídricos de las cuencas de San Juan, Mendoza y Tunuyán (Pugliese et al. 2014; Gobierno de San Juan, 2017; DGI, 2016).

Variable	Río Mendoza	Río San Juan	Río Tunuyán
Qamb (Ley 25688)	277,0	370,0	168,8
Pérdidas en cauce	261,3	292,2	234,5
Demandas agrícolas	1160,0	1019,4	1833,8
Demandas Residenciales**	248,1	102,2	29,1
Total demanda hídrica	1946,4	1783,8	2316,1
Oferta anual	1524,0	1895,4	873,2

** Considerando las demandas de abastecimiento residencial de las cuencas de estudio, y de acuerdo con las poblaciones por cuenca disponibles para el 2010 (DGI, 2016; INDEC, 2010), las dotaciones residenciales calculadas para 2010 en litros por persona y por día (l/p/d) para las cuencas de los ríos Mendoza, San Juan y Tunuyán, son de 605, 872 y 122, respectivamente.

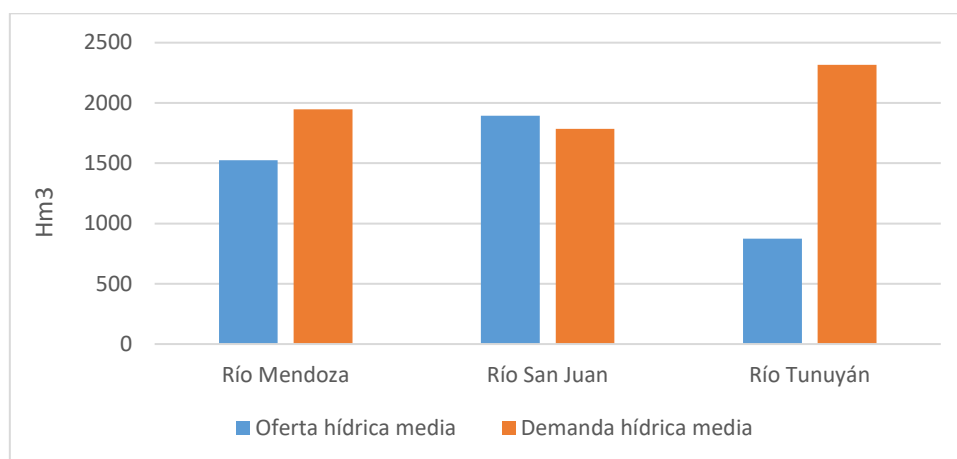


Figura 7. 3. Oferta y demanda hídrica media anual para las cuencas de estudio.

En las cuencas de los ríos Mendoza, San Juan y Tunuyán, las demandas volumétricas totales superan a la oferta hídrica en 21,7, 71,4 y 62,3 %, respectivamente. Lo anterior justifica la construcción de represas en los tres ríos, a fin de poder regular el recurso hídrico para los usos requeridos. Cabe destacar que, si en el balance no se tomaran en cuenta las pérdidas en cauce y las demandas ambientales, la oferta sería superior a la demanda en el río Mendoza por un 5,6 %. Para el caso de los ríos San Juan y Tunuyán, la no consideración de estas variables haría que el balance siguiera negativo a favor de la demanda hídrica. Observando el balance mensual (Figura 7.4), se exponen las diferencias temporales en función de las estaciones climáticas anuales y los períodos de mayor o menor consumo de agua por parte de los cultivos.

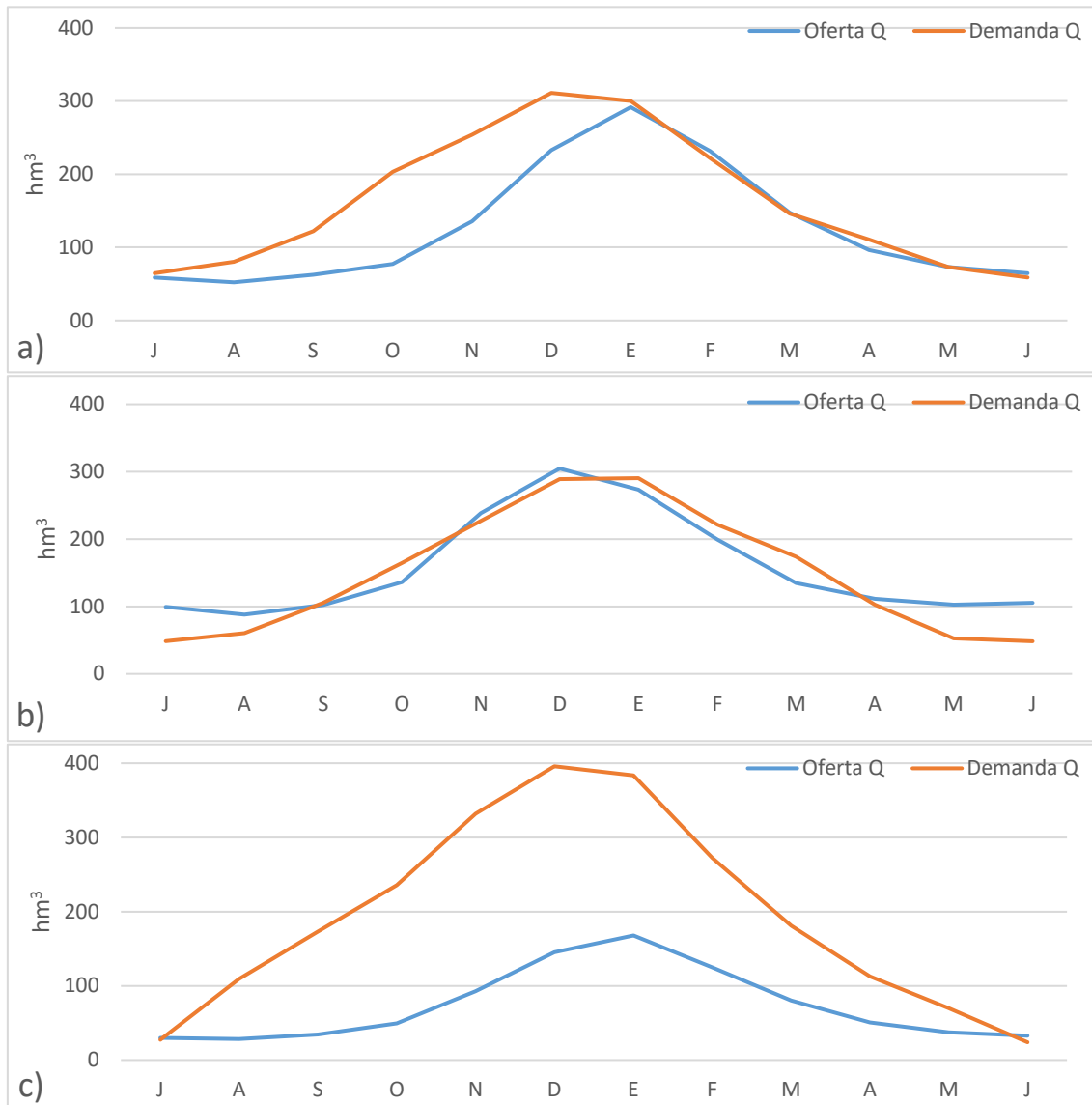


Figura 7. 4. Oferta y demanda hídrica media mensual para las cuencas de estudio: a) río Mendoza; b) río San Juan; c) río Tunuyán.

En una escala temporal media mensual, el balance de los ríos considerados expone la curva de demanda por encima de la oferta hídrica en casi la totalidad de los meses. Si bien para estos escenarios la demanda ambiental y pérdidas en cauce están considerados, la curva de demanda debería estar cercana a la curva de oferta, a fin de que ésta última pueda satisfacer las necesidades hídricas naturales y sociales.

En cuanto a magnitudes, la demanda máxima producto de las mayores necesidades agrícolas coincide con la máxima de oferta hídrica en los meses del verano austral (dado el mayor aporte del glaciar a los ríos por las altas temperaturas). Cabe destacar que la demanda agrícola también coincide con la demanda ecológica de los humedales, cuyos máximos evapotranspirativos ocurren también durante el verano, propiciándoles una mayor susceptibilidad al estrés hídrico.

Por otra parte, considerando que las demandas ambientales y pérdidas en cauce no se modifican y que deben asegurarse las demandas residenciales de la población (con tendencia creciente), el balance obtenido tendría que ser corregido desde la demanda agrícola en los oasis de Mendoza, San Juan y Tunuyán. Su consumo representa (en total volumétrico medio anual) un 76,1, 53,7 y 215,7 % respecto a la oferta de los ríos Mendoza, San Juan y Tunuyán. Como parte de los cálculos derivados de la ecuación [7.2], en la Tabla 7.2 se presentan los resultados del balance hídrico respecto a los caudales ambientales en las cuencas estudiadas.

Tabla 7. 2. Volúmenes (hm³) derivados del balance hídrico (ecuación [7.1]) versus volúmenes de caudal ambiental obtenidos mediante la propuesta de Ley argentina N° 25688.

Variable	Río Mendoza	Río San Juan	Río Tunuyán
Balance hídrico (ec. [7.1])	-145,4	481,6	-1224,2
Qamb (Ley N° 25688)	277,0	370,0	168,8

En la Tabla 7.2 el balance hídrico con énfasis sobre los caudales ambientales es negativo para los escenarios de dos de las tres cuencas consideradas. La segunda fila de la Tabla (Qamb Ley N° 25688) expone el déficit de agua que el sistema regional no aporta a los cauces para satisfacer las demandas ambientales. Respecto a San Juan, el balance positivo explica los remanentes de caudales circulantes que registra la estación de El Encón (mencionado en el capítulo V y mostrado en la Figura 5.18a), ubicada aguas abajo de la confluencia de los cauces de los ríos San Juan y Mendoza.

Si bien el balance para San Juan es positivo (en parte debido a que la oferta hídrica es mayor y la demanda agrícola es menor), sus caudales remanentes no alcanzan para satisfacer las necesidades del sitio Ramsar. Los humedales de esta zona son producto histórico y natural de la afluencia de los tres ríos involucrados, de los cuales dos dejan de fluir (a causa del balance negativo – ríos Mendoza y Tunuyán), y uno fluye bajo remanentes insuficientes (río San Juan).

Esta situación (que en la actualidad no considera caudales ambientales ni pérdidas en cauce), produce una alta disminución o desecación de los caudales de los ríos aguas abajo de los oasis irrigados, representando la principal causa de degradación de los humedales asociados al sitio Ramsar de estudio.

CONCLUSIÓN

Las características locales del ciclo hidrológico permiten establecer relaciones entre la cantidad de agua disponible para diversos usos. El concepto de balance hídrico contrasta a los factores de oferta y demanda de agua en una región, definiendo así la disponibilidad del recurso hídrico local. Comparando los factores del balance en términos de los caudales ambientales, los resultados

exponen diferencias superiores a -145 % en Mendoza, alcanzando incluso los --1224 % para Tunuyán y un máximo de -481 % para San Juan. Es decir, lo calculado mediante la metodología de caudales ambientales (Ley argentina N° 25688) es superior en dichos porcentajes a lo que arrojan los balances hídricos locales (a excepción de San Juan, cuyo balance es ligeramente superior a los caudales ambientales calculados).

Esto no es más que una expresión del déficit de agua para satisfacer las demandas ambientales, cuyas consecuencias se manifiestan en la ya conocida degradación del sistema de humedales del sitio Ramsar de estudio. Un punto de partida para lograr un equilibrio en el balance hídrico regional es ajustar la importancia de cada parámetro, de modo que las demandas se modifiquen a la disponibilidad de recursos hídricos y no al contrario. De esta forma, el alcance de las actividades económicas tendrá límites en cuanto a la cantidad de agua destinada para estos usos, lo cual podría promover un incentivo a la modernización de técnicas de eficiencia del uso del agua.

Si bien en la región y mediante leyes locales las dotaciones residenciales de agua no pueden disminuirse (aun cuando son superiores a los 250 l/p/d recomendados por las Naciones Unidas), una legislación similar y aplicada a los caudales ambientales podría ejercer presión sobre las actividades económicas, a fin de que puedan ajustarse a las realidades de los sistemas locales y a su vez permita la recuperación y mitigación de ambientes naturales afectados por la desecación de espacios por acción humana.

Asimismo, y desde el punto de vista humano, una mayor planificación de las demandas hídricas podría hacer que los 40 l/p/d (mencionado en el Capítulo II) que consumen en promedio los habitantes dentro del sitio Ramsar, puedan ajustarse a los estándares medios recomendados por las Naciones Unidas, lo cual incide en la mejora de su calidad de vida y en las condiciones para evitar la emigración debido a carencias de servicios básicos.

REFERENCIAS

Bastidas, L. (2021). Análisis del Caudal Ambiental en los Ecosistemas Lacustres de Guanacache, Desaguadero y Bebedero, Región de Cuyo, Argentina. Primer Lugar en el Concurso MT3M "Mi Tesis en 3 Minutos". VII Jornadas del Programa de Posgrado. Departamento de Geografía y Turismo. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.

Departamento general de Irrigación, DGI. (2016). Balances Hídricos de las Cuencas de la Provincia de Mendoza. Gobierno de la Provincia de Mendoza. Consultado de: <https://www.mendoza.gov.ar/economia/wp-content/uploads/sites/44/2016/09/PINA-Balances-H%C3%ADdricos-de-las-Cuencas-de-la-Provincia-de-Mendoza.pdf>

Gobierno de San Juan (2017). Estrategia Provincial para el Sector Agroalimentario 2017 – 2026. Consultado de:

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/05/san_juan_2017_con_actualizacion_2022.pdf

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. (2021). UN-Water analytical brief Water-use efficiency. Naciones Unidas. Consultado de: <https://www.unwater.org/publications/un-water-analytical-brief-water-use-efficiency/>

Gálvez, J. (2011). Cartilla técnica: balance hídrico superficial. Sociedad Geográfica de Lima – Fondo Peruano para el Agua. Lima. Consultado de: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf

Legislatura de Mendoza. (2021). Balance Hídrico del Río Mendoza: Por Ley piden que se actualice el documento técnico. Consultado de: <https://www.legislaturamendoza.gov.ar/balance-hidrico-del-rio-mendoza-por-ley-piden-que-se-actualice-el-documento-tecnico/>

Llop, A. Fasciolo, G. Duek, A. Comellas, E. y Bucceri, M. (2013). El balance hídrico en las cuencas de Mendoza: aportes para su medición. Resultados de las investigaciones – Proyección. Vol. VIII – junio 2013 – pp. 48-67. Consultado de: https://bdigital.uncuyo.edu.ar/objetos_digitales/12801/04llop-proyeccion14.pdf

Pugliese, F. Alonso, M. y Espinola, R. (2014). Gestión Integrada del Agua de Riego. 25 de Mayo Valle de Tulum – Provincia de San Juan. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA. Consultado de: <https://www.scribd.com/document/422107458/Gestion-Integrada-Del-Agua-de-Riego-Valle-Del-Tulum-San-Juan-Argentina#>

Sáenz, C. (2014). Conocer el balance hídrico como herramienta para optimizar el uso del agua. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. República Argentina. Consultado de: <https://inta.gob.ar/documentos/conocer-el-balance-hidrico-como-herramienta-para-optimizar-el-uso-del-agua>

Suescún, L. y Alarcón, J. (2018). Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare. Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. Consultado de: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15989/1/Proyecto%20Final.pdf>

The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO. (2006). Evaluación de los recursos hídricos: elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas. Naciones Unidas. Consultado de: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000228100.locale=en>

United Nations, UN. (2020). UN-Water Annual Report 2020. Naciones Unidas. Consultado de: <https://www.unwater.org/app/uploads/2021/11/Annual-Report-2020.pdf>

Velásquez-Restrepo, M. y Poveda, G. (2019). Estimación del balance hídrico de la región Pacífica Colombiana. DYNA, 86(208), pp. 297-306. Consultado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/73587/70363>

Capítulo VIII

ANÁLISIS BASADO EN LA DECLARACIÓN DE BRISBANE (2018) Y EL INFORME DEL IPCC (2021) SOBRE LOS CAUDALES AMBIENTALES EN EL SITIO RAMSAR

INTRODUCCIÓN

Arthington (2018) relaciona la pérdida de ecosistemas acuáticos con la contaminación (p. ej., riego desmedido, construcción de represas, entre otros). Siendo la autora principal de la Declaración de Brisbane sobre Caudales Ambientales (2018), explica que el término emergió y permanece como un marco de referencia para proteger o restaurar el recurso hídrico que abastece a los ecosistemas acuáticos.

Relacionado a sus orígenes y como parte de la urgencia de proteger los espacios fluviales y lacustres a nivel mundial, en 2007 se realizó el 10° Simposio Internacional de Ríos y Conferencia Internacional de Caudales Ambientales. Mediante este encuentro, celebrado en Brisbane (Australia), más de 750 especialistas (científicos, economistas, ingenieros y políticos) se reunieron para proclamar la Declaración de Brisbane (Arthington et al., 2018).

Esta declaración resaltó la importancia de los caudales ambientales para las sociedades y los ecosistemas de humedales, fluviales, riparios y lacustres. En este sentido, se convirtió en el primer documento que reunió a especialistas e interesados de todos los continentes para emitir un comunicado internacionalmente aceptado.

La definición de caudales ambientales que incluía esta declaración (2007) se dicta como:

“Cantidad, frecuencia y calidad de los flujos hídricos requeridos para mantener ecosistemas de agua dulce y estuarios, así como también el sustento humano y el bienestar que depende de dichos ecosistemas”.

Una década después, los objetivos de esta declaración fueron revisados, actualizados y ampliados en el 20° *International River symposium* y Conferencia sobre Caudales Ambientales, celebrado en Brisbane (Australia) en 2017. Posteriormente y un año después, Arthington et al. (2018) publican un artículo que recogió el conocimiento y avance desde 2007, presentando así un trabajo que buscó hacer un llamado urgente para la acción, protección y restauración de los caudales ambientales y ecosistemas acuáticos para efectos de su biodiversidad, valores intrínsecos, servicios ecosistémicos y manejo de recursos hídricos.

Arthington et al. (2018) establecen que esta declaración:

“...presenta un llamado urgente a la acción, protección y restauración de los caudales ambientales y ecosistemas acuáticos para el manejo de su biodiversidad, valores intrínsecos y servicios ecosistémicos, como parte de un elemento integrado en el manejo de recursos hídricos”.

Además del crecimiento de población y las demandas hídricas, uno de los problemas que ejemplifica la declaración es la creciente construcción de represas, situadas frecuentemente sobre cuencas sensibles desde el punto de vista ecológico. En este sentido, el objetivo de la declaración de 2018 enfatiza sobre la necesidad de ejecutar mayores esfuerzos para proteger y restaurar ecosistemas hidro-dependientes, mediante la implementación y adaptación de los caudales ambientales. Wineland et al. (2021) explican que algunos de los mayores problemas para la implementación de los caudales ambientales son: a) ausencia de autoridad para implementar los caudales ambientales; b) gobernanza del agua fragmentada en sistemas transfronterizos; c) declive de disponibilidad de agua e incremento de su variabilidad dentro del contexto del cambio climático; d) ausencia de consideración de aspectos no biofísicos (p. ej., socioeconómicos).

Siendo el marco legal (sobre los caudales ambientales) uno de los principales problemas e inconvenientes a nivel mundial, O`Donnell et al. (2019) trabajaron en Australia (uno de los países con más investigadores y políticas relacionadas a los caudales ambientales), con el fin de generar confianza y mantener el marco de legitimidad en los objetivos de los caudales ambientales. Asimismo, estos autores (en sintonía con la declaración de Brisbane) argumentan acerca de las ventajas de invertir en el apoyo de la comunidad, demostrando resultados de los programas ambientales de agua.

Adicionalmente, la declaración estuvo estrechamente ligada a los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ONU, 2015), sobre los cuales se establecieron seis recomendaciones generales sobre los caudales ambientales y a través de legislaciones, regulaciones, manejos, investigaciones y vínculos con actores y organismos competentes, enmarcados dentro de la Agenda de Acción Global (Arthington et al., 2018).

El nuevo elemento incluido en dicha Agenda fue el énfasis sobre la participación equitativa de sociedades y personas involucradas, más allá de cualquier forma de discriminación. En este sentido, la Agenda toma un rol social en la evaluación e incorporación de los caudales ambientales como un bien común a proteger.

Basado en las recomendaciones sobre los vínculos con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (UNDP, 2015), los autores sugieren establecer análisis directamente relacionados con los indicadores:

- Niveles de estrés hídrico.
- Cambios históricos en la extensión de ecosistemas vinculados al agua.

E indirectamente relacionado con:

- Reducción de la pobreza.
- Eliminación del hambre.
- Salud y bienestar.
- Trabajo adecuado y crecimiento económico.
- Manejo sustentable y eficiente de recursos naturales.
- Paz, justicia e inclusión social para el desarrollo sustentable.

Asimismo, se hace mención sobre seis declaraciones, las cuales se enfocan sobre la protección de los ecosistemas acuáticos y sus sociedades, la importancia de uso de los caudales ambientales, la valoración de las culturas y conocimientos locales y la lucha contra el cambio climático, enmarcadas a su vez sobre aspectos de liderazgo, manejo e investigación. En este sentido, Tharme et al. (2018) definen a los ríos como sistemas socio-ecológicos, cuyos habitantes y sus culturas y formas de vida se relacionan directamente con su entorno acuático. Estos autores enfatizan en el rol social de los caudales ambientales, cuyo marco técnico e institucional debe enfocarse sobre la relación sociedad-naturaleza que se presenta para su efectiva implementación.

Adicionalmente, la declaración hace énfasis en los *“cambios que emergen bajo escenarios de crecientes demandas hídricas humanas y cambio climático”*. En este sentido, la Agenda de Acción Global (2018) apunta hacia las consecuencias derivadas del cambio climático y los riesgos que supone para el manejo sustentable de ecosistemas y de caudales ambientales. De esta forma, la declaración de Brisbane concluye que *“el cambio climático incrementa el riesgo de degradación de ecosistemas acuáticos e intensifica la urgencia para la acción e implementación de caudales ambientales”*.

Acerca de la declaración de Brisbane, Valdés (2018) expone que

“El mayor reto es aceptar que el mantenimiento de los ecosistemas de los ríos sanos es la base para el desarrollo de las actividades humanas dentro de una cuenca”.

Por consiguiente, el conocimiento multidisciplinario y horizontal (entre comunidades, actores e investigadores), permitiría que los caudales ambientales se conviertan en herramientas eco-hidrológicas para la administración sostenible del agua.

Posterior al año de publicación de esta declaración (2018), fue divulgado el VI informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*). Este documento (IPCC, 2021) recopila las diferentes evidencias, consecuencias, escenarios y acciones para enfrentar al Cambio Climático. Si bien el VI informe del IPCC no hace mención de los caudales ambientales, mediante la declaración de Brisbane (2018) se establece un vínculo estrecho, el cual está determinado por los alcances y escenarios del cambio climático, la vulnerabilidad de los ecosistemas y sociedades y la importancia de la implementación de estos caudales dentro de las actividades humanas.

Xi et al. (2020) establecen que si bien la convención de Ramsar promueve la conservación de humedales, la mitigación del cambio climático es esencial para la conservación de humedales, evitando que el 47 % de superficie de humedales perdida entre 1980 y 2014 aumente con el tiempo (proyectado para un 52 % más de pérdidas en 2100).

Como objetivo de este capítulo, se propone analizar la situación actual y prospectiva del sitio Ramsar de estudio, teniendo como base a la Declaración de Brisbane (2018) y el VI informe del IPCC (2021). Asimismo, se hace especial énfasis sobre la contribución de los humedales sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (mencionados y recomendados dentro de la declaración de Brisbane) (Arthington et al., 2018).

METODOLOGÍA

Como método de trabajo se realiza una vinculación cualitativa entre el estado actual y prospectivo del humedal de estudio respecto a la declaración de Brisbane (Arthington et al., 2018). En este sentido, se hace énfasis en el alcance de la definición (actual y aceptada) de caudales ambientales, los vínculos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y su relación con otras resoluciones y declaraciones similares, así como también respecto a las recomendaciones basadas en la Agenda de Acción Global (AAG) sobre Caudales Ambientales de 2018 (provistos en la misma declaración).

Dentro de las seis recomendaciones de la AAG (las cuales serán analizadas respecto a su importancia para el establecimiento de los caudales ambientales), se destaca con especial énfasis el último ítem, relacionado al cambio climático y el riesgo que supone sobre los ecosistemas acuáticos. Para esta sección, se propone analizar el estado actual y prospectivo del humedal del estudio, así como los resultados de caudales ambientales hallados, respecto al último informe (VI) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC. 2021). De esta forma, las tendencias históricas de los caudales se vincularon con los pronósticos publicados por el VI informe, cuyo contraste se enfocó sobre las tendencias regionales que el IPCC publicó para la región cuyana argentina.

El objetivo de esta sección se basó en alertar sobre los vínculos que pudieran existir en la relación cambio climático – caudales (incluyendo a los caudales ambientales y teniendo al sitio Ramsar como zona de estudio). Dicho vínculo se centró en los análisis y pronósticos generales y regionales que el informe del IPCC estimó para el 2021.

Dado que los caudales ambientales se asientan metodológicamente sobre la base de las escorrentías consideradas, el vínculo con el cambio climático puede ayudar a estimar la evolución que esta variable hidrológica ambiental puede tomar en el futuro inmediato y próximo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La declaración de Brisbane y la Agenda de Acción Global (AAG) sobre caudales ambientales

La definición

De acuerdo con la última declaración, Arthington et al. (2018) definen a los caudales ambientales como:

“...cantidad, frecuencia, calidad y niveles de agua necesarios para sostener ecosistemas acuáticos, los cuales a su vez sustentan culturas, economías, formas de vida sustentables y bienestar social”.

Relacionando este concepto con el propuesto una década anterior durante la primera declaración, la nueva definición comenzó a incorporar a todos los sistemas acuáticos, siendo a su vez más inclusivo en cuanto a las actividades humanas dependientes de dichos ecosistemas, las cuales van desde las formas de vida y bienestar, hasta las culturas y economías.

Bajo esta declaración y de acuerdo con los autores, los ecosistemas acuáticos incluyen a los ríos y sus franjas riparias, afloramientos hídricos, llanuras de inundación, humedales, lagos, cuerpos de aguas costeras y ecosistemas dependientes de flujos subterráneos. Asimismo, la expansión del rol de los caudales ambientales sobre el bienestar humano radica en que la salud de los ecosistemas directamente afectados por éstos determinan en gran medida a la sustentabilidad de las sociedades y sus economías a futuro.

Cabe destacar que entre las discusiones de la declaración de 2018, algunos investigadores propusieron cambiar el nombre de caudales ambientales por “agua ambiental” o “agua para el ambiente”, los cuales pueden denotar más la noción de volumen que de caudal. Esta referencia se adecuaría más a la situación del sitio Ramsar de estudio, cuyo contexto actual no incluye a flujos de agua superficiales continuos.

Relacionado a la definición, los caudales ambientales no existen como afluentes al sitio Ramsar de estudio. Si bien pueden fluir pulsos ocasionales, la cantidad y frecuencia no es la adecuada para mantener los humedales aguas abajo. Como se mencionó en el Capítulo anterior, es la razón principal de degradación del sitio Ramsar. A su vez, su ausencia repercute directamente sobre la calidad y modos de vida de los pobladores del lugar, por lo que el concepto se relaciona más con un objetivo a lograr que con una medida para disminuir futuras degradaciones.

Las elevadas demandas hídricas de la zona, sumadas a la aridez natural de la región y la fragilidad de los humedales aguas abajo, convierten a los caudales ambientales en un objetivo urgente, cuyo costo es del tamaño de lo que las instituciones competentes estén dispuestas a ceder para lograr sus objetivos. En este sentido, la implementación asegura una restauración de los ecosistemas y un mejoramiento de las condiciones de vida de las personas afectadas, no sin antes repercutir sobre la economía. Bajo este análisis, el sistema económico

debe ceder un flujo adecuado en calidad, cantidad y frecuencia, el cual permita lograr que los objetivos de los caudales ambientales se cumplan.

Para la región cuyana de estudio, si bien los reclamos por la implementación de caudales ambientales siguen vigentes, algunas organizaciones no gubernamentales de acción ecológica y sectores de la sociedad han entendido la dificultad de su implementación efectiva. Más allá de un potencial pesimismo, la realidad económica de la región, sumada a crisis climática, alejan cada vez más la posibilidad de cumplir con los objetivos de dichos caudales.

Si bien la tecnificación y la eficiencia del consumo de agua para riego podría ser una solución, nada indica que los volúmenes hídricos ahorrados a través de dicha eficiencia satisfagan las demandas ambientales sobre las agrícolas. Por estas razones, algunos organismos y comunidades se han organizado desde hace varios años para ejecutar obras que intenten restaurar zonas específicas del humedal (p. ej., azudes), en vez de esperar que los flujos lleguen a través de los cauces afluentes.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

En septiembre de 2015, fue celebrada en Nueva York la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, mediante la cual fue aprobado el documento “*Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*” (ONU, 2015). A través de dicho documento y aprobado por los países miembros (entre ellos Argentina), se discutieron y aceptaron 17 objetivos, los cuales incluyen 169 metas a ser cumplidas para el 2030.

La iniciativa, vigente desde el 1 de enero de 2016, tiene como pilares a la sostenibilidad ambiental, la inclusión social y la atención de las sociedades vulnerables. Mediante su rango de acción global, el enfoque involucra a los países en desarrollo, promoviendo la participación gubernamental y social, dentro del respeto a las políticas y capacidades nacionales de cada país (Argentina.gob.ar, 2022).

Para 2030, los ODS tienen como objetivo erradicar la pobreza, garantizar la sustentabilidad ambiental y mejorar las condiciones de prosperidad humana sin distinción alguno (Figura 8.1). Argentina, como país miembro y suscriptor de los ODS, se comprometió a aplicar las recomendaciones, dependiendo de su realidad económica, social y ambiental (Argentina.gob.ar, 2022b).



Figura 8. 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (Agenda 2030). Fuente: Argentina.gob.ar, (2022b).

En la Figura 8.1 se enumeran los 17 objetivos, cada uno de los cuales incluye metas o acciones para su cumplimiento. Arthington et al. (2018) expresan en la declaración de Brisbane que los requerimientos de caudales ambientales están directamente relacionados con las metas de los ODS:

Objetivo 6 (agua y saneamiento), meta 4: referido a los niveles de estrés hídrico. Se incentiva a usar eficientemente los recursos hídricos, con el fin de asegurar la sostenibilidad entre la extracción y el abastecimiento.

Objetivo 6 (agua y saneamiento), meta 6: relacionado a los cambios en las extensiones de agua en ecosistemas a través del tiempo. Priorizar la protección y restablecimiento de ecosistemas relacionados con el agua (incluidos los humedales, ríos, acuíferos y lagos).

Mediante estas metas del Objetivo 6, los ODS otorgan especial atención al uso eficiente del agua, el cual debe incluir a las demandas ambientales para garantizar la sustentabilidad de espacios naturales vulnerables.

Adicional e indirectamente, Arthington et al. (2018) establecen que los ODS se relacionan con los caudales ambientales a través de los siguientes objetivos:

Objetivo 1 (fin de la pobreza).

Objetivo 2 (hambre cero).

Objetivo 3 (salud y bienestar).

Objetivo 8 (trabajo decente y crecimiento económico).

Objetivo 12 (producción y consumo responsables).

Objetivo 16 (paz, justicia e instituciones sólidas).

Para el caso del sitio Ramsar de estudio, el cumplimiento de estos objetivos y metas lograrían asegurar caudales ambientales que restituyan los ecosistemas de humedales. La recuperación de estos espacios indirectamente permitiría que las sociedades presenten mejores condiciones de vida, eliminando la pobreza, asegurando la alimentación y salud y mejorando las capacidades económicas y de producción locales.

Adicional a la relación indirecta entre los ODS y los caudales ambientales (propuesta por Arthington et al., 2018) y dada la particularidad y vulnerabilidad del sitio Ramsar de estudio, dichas relaciones podrían ampliarse a otros objetivos. De esta forma, también podrían incluirse:

Objetivo 4 (educación de calidad).

Objetivo 9 (industria, innovación e infraestructura).

Objetivo 10 (reducción de las desigualdades).

Objetivo 11 (ciudades y comunidades sostenibles).

Objetivo 13 (acción por el clima).

Objetivo 15 (vida de ecosistemas terrestres).

Si los ecosistemas de humedales del sitio Ramsar son restaurados y el espacio degradado se territorializa y patrimonializa por sus comunidades, el lugar podría tomar mayor valor estratégico dentro la región. De esta forma:

La educación de calidad podría asegurar la formación de jóvenes sin que tengan que emigrar.

El desarrollo industrial sustentable y la innovación podrían mejorar el desarrollo de las condiciones económicas locales, aumentando sus capacidades competitivas y comparativas.

Las desigualdades sociales entre los habitantes del sitio Ramsar y los habitantes de los oasis disminuirían, permitiendo que los primeros puedan acceder a mejores condiciones de vida.

La restauración de los humedales podría consolidar los pequeños núcleos poblados de la zona, vinculándolos a formas de vida sostenibles con el planeta y con su entorno de humedales.

Finalmente, la restauración de los humedales provocaría que su rol como sumideros de carbono sea positivo a favor del balance por la descarbonización del planeta y en la lucha contra el cambio climático y la pérdida de biodiversidad (Ramsar, 2019).

Las recomendaciones prácticas sobre los caudales ambientales

De acuerdo con Arthington et al., (2018), la declaración de Brisbane provee seis grandes grupos de recomendaciones, relacionadas a las prácticas para la

implementación de los caudales ambientales. En esencia común y a través de palabras de los autores, dichas prácticas explican que

“...los caudales ambientales son esenciales para proteger y restaurar ecosistemas acuáticos, así como para entregar importantes servicios ecosistémicos, cuyos beneficios van en pro del mantenimiento de las culturas, economías, formas de vida sustentable y bienestar”.

Asimismo, en la declaración, los autores engloban las recomendaciones dentro de tres principales categorías:

Liderazgo y gobernanza, las cuales envuelven a los distintos niveles de gobierno (supranacional a local), incluyendo a los tomadores de decisiones comunitarios.

Mantenimiento, cuyo término hace alusión a la planificación, evaluación implementación, monitoreo y capacidad adaptativa de los caudales ambientales por parte de las partes interesadas (individuos y colectivos públicos y privados).

Investigación, la cual enfatiza acerca de la necesidad continua de profundizar en las investigaciones sobre caudales ambientales y sus múltiples relaciones con el ambiente y la sociedad.

Sobre la base de estas tres recomendaciones macro, la AAG sobre caudales ambientales de 2018 (Arthington et al., 2018) llama a la protección y restauración de los caudales ambientales, basados en las siguientes declaraciones:

1. Los caudales ambientales son esenciales para proteger y restaurar la biodiversidad, ecosistemas acuáticos y los servicios ecosistémicos que proveen a las sociedades.
2. Los caudales ambientales son críticos para proteger y restaurar el patrimonio natural y cultural del mundo.
3. Los caudales ambientales han sido comprometidos y hoy muchos sistemas acuáticos en el mundo están en riesgo.
4. La implementación de caudales ambientales requiere un paquete de medidas políticas, legislativas, regulatorias, financieras, científicas y culturales, cuyas normas y valores aseguren su entrega efectiva, así como sus beneficios posteriores.
5. El conocimiento local y las prácticas tradicionales de gestión del agua pueden fortalecer la planificación de los caudales ambientales, así como su implementación y sostenibilidad.
6. El Cambio climático incrementa el riesgo de degradación en ecosistemas acuáticos, intensificando la urgencia para la acción e implementación de caudales ambientales.

Las recomendaciones, basadas en el liderazgo y gobernanza, mantenimiento e investigación, incentivan el trabajo entre las acciones gubernamentales, privadas y comunitarias, bajo marcos legales y de acción adecuadas para garantizar el cumplimiento de objetivos. Asimismo, el manejo se orienta hacia las prácticas,

programas y herramientas de planificación que pueden ser puestas en práctica para remediar, restaurar, mantener y asegurar los caudales ambientales en una determinada zona. Finalmente, desde la investigación, los autores llaman a profundizar en el conocimiento de las relaciones ecológicas, hidrológicas, sociales y culturales de la región de estudio, con el fin de integrarlas como un conocimiento que permitirá una mayor precisión (actual y futura), en la toma de decisiones por parte de los organismos e individuos interesados.

Desde el sitio Ramsar de estudio, las medidas recomendadas por Arthington et al., (2018) no sólo se complementan con los ODS, sino que orientan puntualmente en la valoración de los caudales ambientales como elemento restaurador y esencial para la zona.

Si bien para el sitio Ramsar la disminución y ausencia de caudales ambientales significó el comienzo de su degradación, basado en la declaración de Brisbane y los ODS, estos caudales podrían significar la diferencia entre el declive definitivo de los ecosistemas y la restauración de su marco socioambiental.

Como se mencionó con anterioridad, acciones gubernamentales, comunitarias y de organizaciones no gubernamentales han logrado restaurar algunas zonas, utilizando azudes para retención de agua de lluvia. Sin embargo, estas acciones secundarias no han logrado que desde los oasis se garanticen caudales ambientales, por lo que el problema de origen sigue vigente.

Finalmente y resaltando la declaración N° 6 mencionada (Arthington et al., 2018), las acciones toman mayor urgencia bajo el riesgo que supone el cambio climático, por lo que puntualmente incentivan a la investigación de este aspecto y cómo puede relacionarse con los caudales ambientales y las condiciones socio-naturales de cada zona en particular.

Nexo de los caudales ambientales hallados con los escenarios de cambio climático dispuestos en el VI informe del IPCC (2021)

El análisis de las fluctuaciones de la precipitación, temperaturas y caudales en un contexto espacial y temporal (Capítulo IV) resaltó las vinculaciones físicas del sitio Ramsar versus la variabilidad natural del clima, el régimen de escorrentía y las evidencias que arroja sobre los impactos de usos antrópicos aguas arriba de la zona. En este sentido y como parte de algunas conclusiones obtenidas, el régimen térmico responde a una variabilidad anual, propia de la región. Sin embargo, mediante el análisis de anomalías, las tendencias positivas se vinculan a escenarios que escalan más allá de la variabilidad climática regional.

Las precipitaciones presentaron pendientes de mayor magnitud de acuerdo con anomalías positivas, evidenciándose además una influencia significativa de

modos de variabilidad climática externa, como los fenómenos ENSO, MEI y PDO, alcanzando una relación explicativa de hasta el 36 % de la variabilidad.

De esta forma, cobra importancia el análisis vinculante entre los indicadores de largo plazo en la región y las conclusiones sobre el Cambio Climático que expone el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático en su sexto informe (IPCC, 2021).

En dicho informe (Arias et al., 2021) se recalca la inequívoca evidencia del calentamiento del sistema climático bajo influencia de origen antrópico y con diversos escenarios a futuro (Figura 8.2). Los cinco escenarios considerados, basados en las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways, SSPs*), se basan en los estadios de aumento de temperaturas, vinculados a la emisión de gases de efecto invernadero, especialmente CO₂.

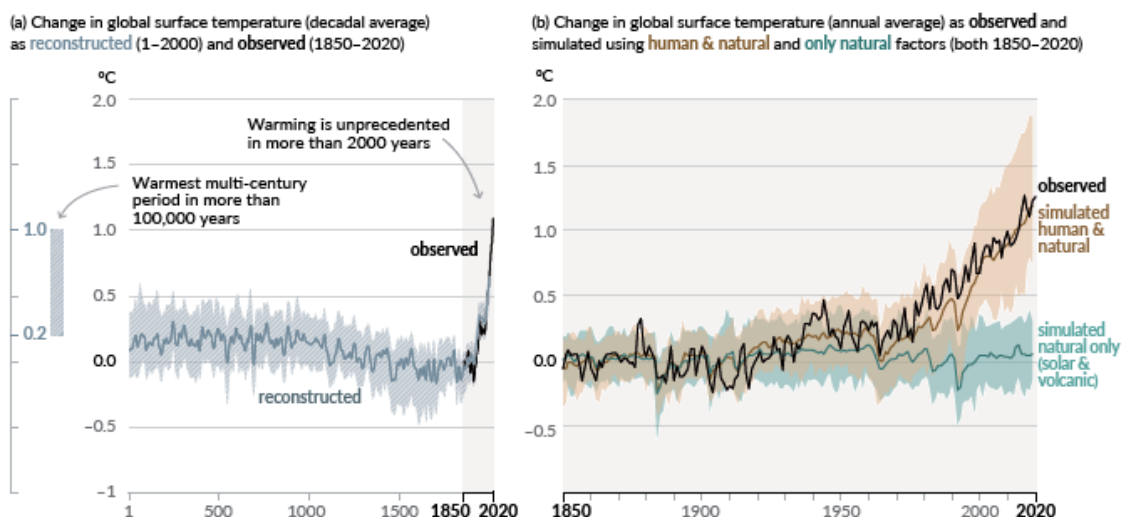


Figura 8. 2. Cambios térmicos en la superficie, relativos al período 1850 – 1900. Consultado del informe Summary for Policymakers (IPCC, 2021b).

Producto del aumento de temperaturas bajo ciertos escenarios (Figura 8.3), las distintas variables climáticas y espacios geográficos responden a la relación causa-efecto (Figura 8.4). En este sentido y relacionado al sitio Ramsar, la provisión de caudales ambientales y el balance hídrico antrópico en los oasis irrigados podrían ser significativamente afectados.

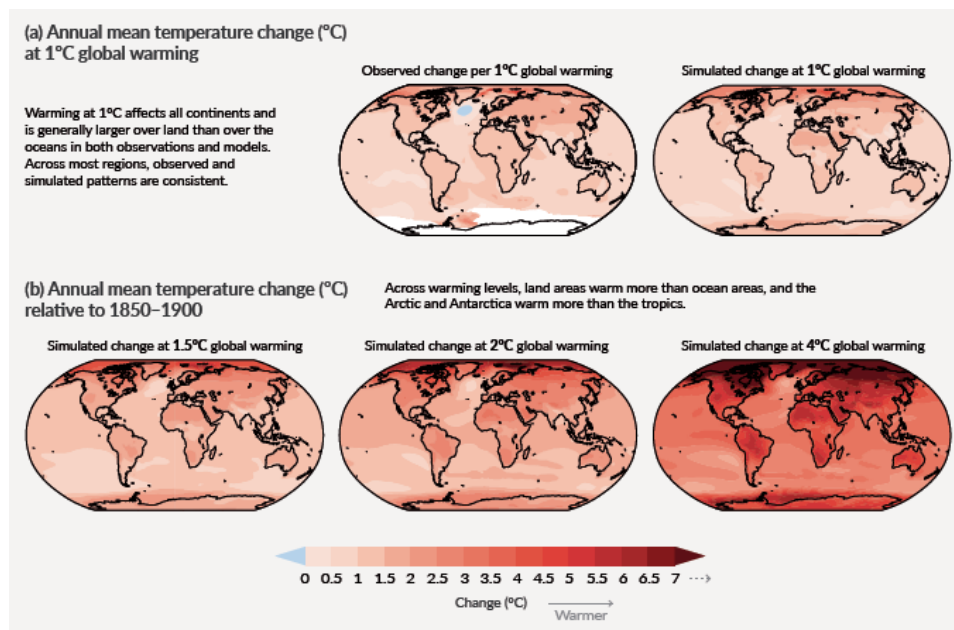


Figura 8. 3. Escenarios de incrementos de calentamiento global. Consultado del informe Summary for Policymakers (IPCC, 2021b).

Desde el informe *Summary for Policymakers* (IPCC, 2021b), el organismo hace énfasis en el aumento de sequías agrícolas y ecológicas inducidas por el ser humano, producto de aumentos en la evapotranspiración potencial (debido al aumento de las temperaturas). Asimismo, expresan que los efectos producidos por los cambios podrían exacerbarse con el tiempo, incrementándose así sus frecuencias e intensidades o severidades. Textualmente en su página 15, inciso B.2.2, el IPCC enuncia (traducido del inglés):

“Con cada incremento adicional de calentamiento global, los cambios extremos continuarán creciendo. Por ejemplo, por cada 0,5 °C adicionales de calentamiento global, causa incrementos en la intensidad y frecuencia de extremos cálidos (muy probable), incluyendo olas de calor, precipitaciones fuertes (alta confiabilidad), así como también sobre sequías agrícolas y ecológicas en algunas regiones (alta confiabilidad). Cambios discernibles en intensidad y frecuencia de sequías meteorológicas con más regiones en incrementos que en decrementos son observados en algunas regiones por cada 0,5 °C de calentamiento global (media confiabilidad). Los incrementos en la frecuencia e intensidad de sequías hidrológicas aumentan con el incremento del calentamiento global en algunas regiones (media confiabilidad)”.

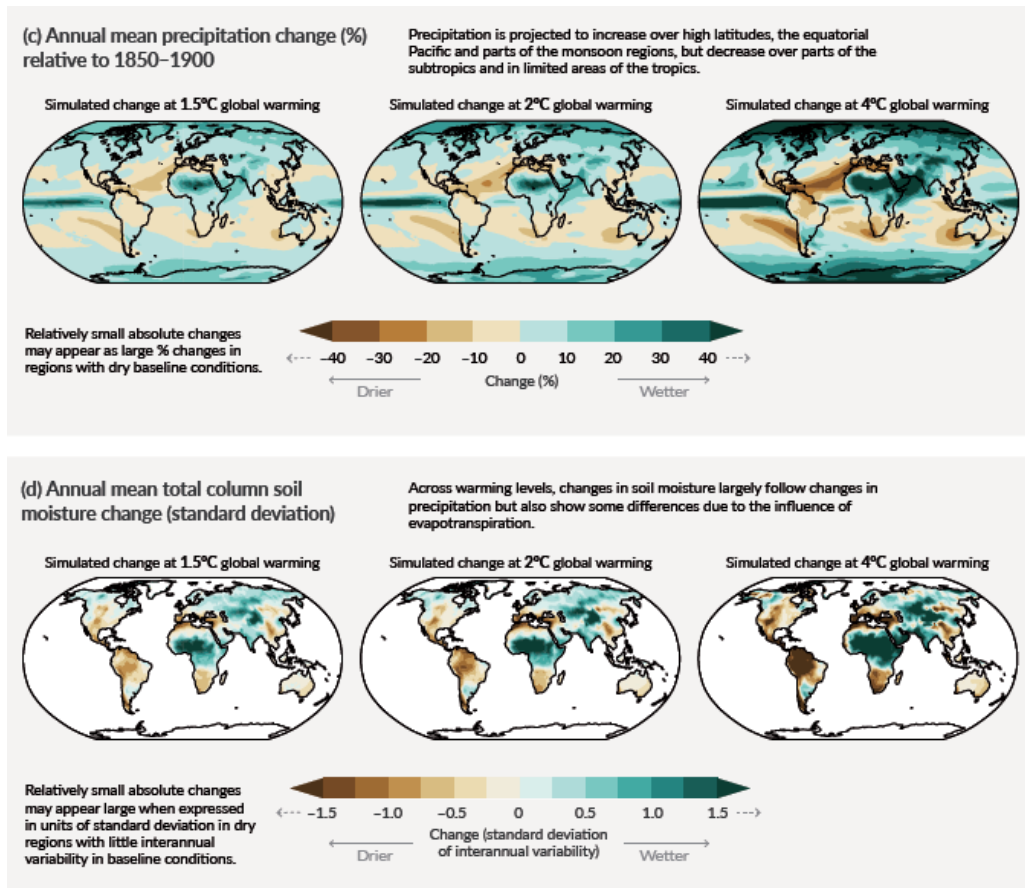


Figura 8. 4. Respuestas de la precipitación media anual (cambio en %) y la columna media anual de humedad de suelo (desviación estándar). Consultado del informe Summary for Policymakers (IPCC, 2021b).

Los escenarios entonces dependerán de las condiciones del calentamiento (Figura 8.5). A partir de esto y dado el balance energético del planeta, los cambios se extrapolan al resto de variables y paisajes geográficos, con especial énfasis en aquellos espacios susceptibles, como las zonas áridas o húmedales.

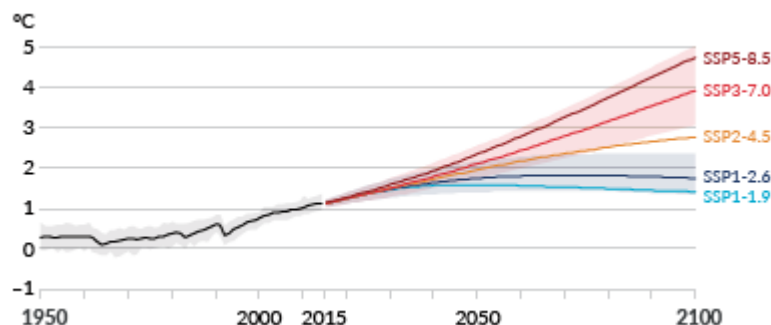


Figura 8. 5. Cambio térmico de superficie global, relativo al período 1850 – 1900. Consultado del informe Summary for Policymakers (IPCC, 2021b).

Relacionado a estos cambios, en los *Regional fact sheet*, el IPCC expone situaciones esperadas para diversas regiones del planeta, así como herramientas visuales de análisis (p. ej., IPCC WGI Interactive Atlas). De esta

forma y para el documento dispuesto para Centro y Suramérica (IPCC, 2021c), los resultados se exponen relacionados a los cambios regionales comunes: temperaturas medias con alta probabilidad de aumentos en todas las subregiones, incluyendo cambios en las precipitaciones medias (Figura 8.7).

Cabe destacar que la regionalización dada por el IPCC se define de acuerdo con las homogeneidades climáticas y características de cada zona. De esta forma, en la Figura 8.6, puede observarse la delimitación considerada para el planeta y Suramérica.

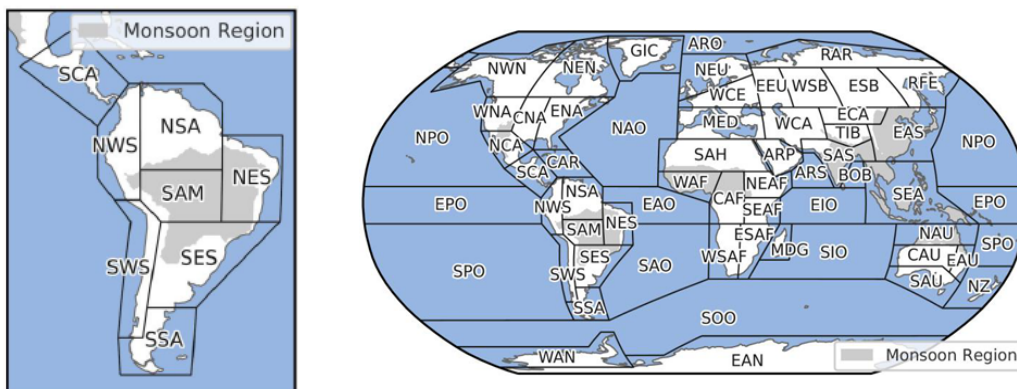


Figura 8. 6. Regiones consideradas dentro del análisis sectorial del IPCC. Consultado de: IPCC (2021c).

El territorio cuyano donde se ubica el sitio Ramsar (Figura 8.6), se encuentra entre las regiones Suroeste de Sudamérica (SWS) y Sudeste de Sudamérica (SES). Si bien no hay límites precisos, la zona cordillerana pertenece a la región SWS, mientras que el polígono del sitio Ramsar se ubica del lado de SES. De esta forma, la zona se sitúa en un borde regional, cuyos análisis son diversos de acuerdo con las estimaciones del IPCC.

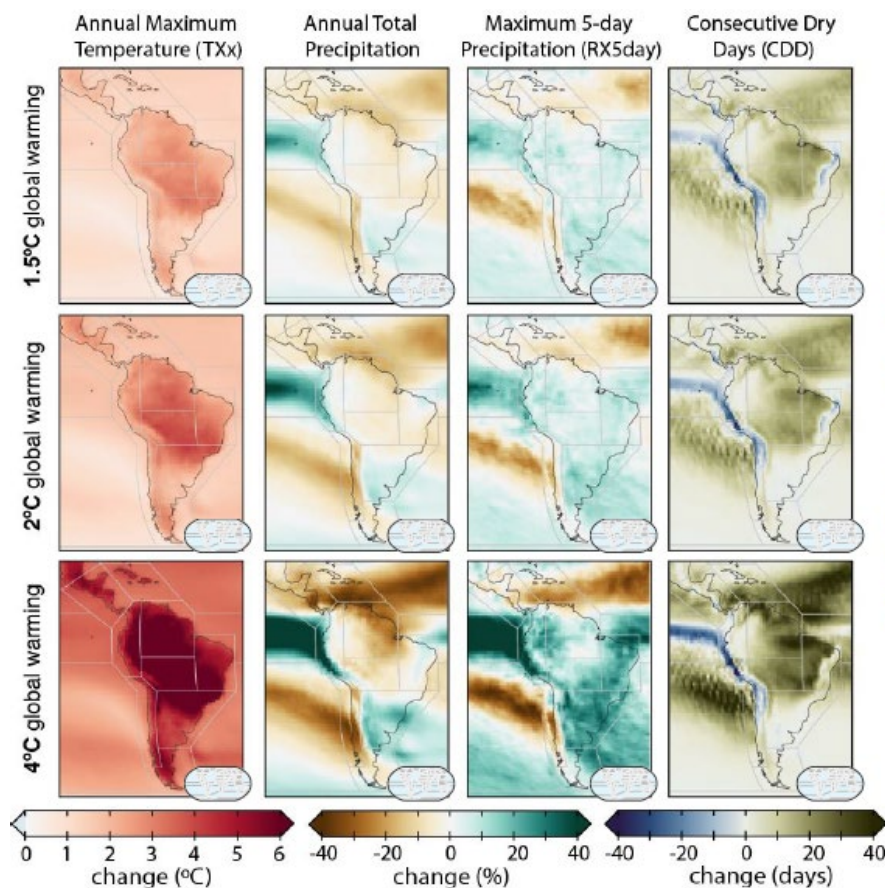


Figura 8. 7. Cambios proyectados en temperatura media anual, precipitación media anual, precipitación máxima para cinco días y días consecutivos secos, con período relativo a 1850 – 1900 y basado en simulaciones usando escenarios SSP5 – 8.5. Consultado del informe Summary for Policymakers (IPCC, 2021b).

Con base en el *Regional fact sheet* (IPCC, 2021c):

Región SWS: zona sujeta a aumentar la frecuencia y severidad de sequías y aridez, potencialmente impactando un amplio sector de actividades y espacios, como agricultura, bosques, salud y ecosistemas (alta confiabilidad). Pérdida continua probable de hielo glaciar y permafrost en la cordillera andina, causando importantes reducciones en las escorrentías.

Región SES: incrementos en precipitaciones extremas e inundaciones producto de ellas, para escenarios superiores a los 2 °C de calentamiento global (confiabilidad media). Adicionalmente y de acuerdo con el Atlas Interactivo del IPCC (Iturbide et al., 2021 y Gutiérrez et al., 2021), en la Figura 8.8 se exponen algunos hallazgos resumidos, enfocados sobre las regiones de interés SWS y SES.

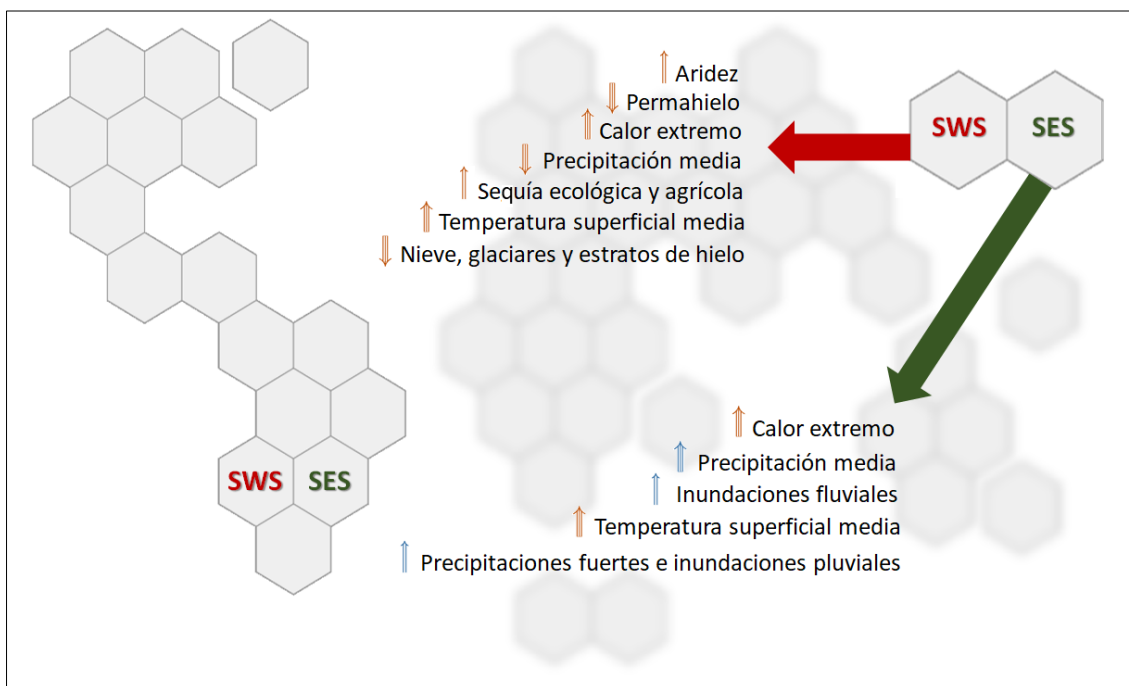


Figura 8. 8. Pronósticos de cambios para las regiones SWS y SES. La dirección de las flechas indica si el pronóstico es incremento o disminución; el número de barras de las flechas indica la confiabilidad (3: alta, 2: media); el color es representativo de condiciones cálidas y secas (naranja) o húmedas (azul). Modificado de la Síntesis Regional del Atlas Interactivo IPCC WGI (Iturbide et al., 2021; Gutiérrez et al., 2021).

Si bien se esperarían precipitaciones extremas en la región SES, serían excepcionales y dentro del tipo climático propio. En este caso y para el sitio Ramsar (tipo climático semiárido – árido), las lluvias de mayor intensidad aún seguirán representando un aporte menor y discontinuo que las escorrentías andinas que forman el oasis natural. Asimismo, se espera un aumento del calor extremo y por lo tanto de la temperatura media, deduciéndose de esta forma un aumento en la demanda evapotranspirativa de agua en la zona (Figura 8.9).

Analizando el efecto del cambio climático sobre la región SWS, el aumento de la temperatura (Figura 8.9), las sequías (traducidas en disminución de nevadas en cordillera) y la pérdida de masa glaciar y permafrost producirán una merma en las escorrentías. El régimen hidrológico de los ríos andinos depende en gran medida del ciclo del agua en cordillera, es decir, de acumulación y fusión/derretimiento del hielo y nieve.

De esta forma, si se espera que los caudales andinos disminuyan, implicaría una mayor presión sobre la dotación de los caudales ambientales hacia el sitio Ramsar, ya que las demandas domésticas y agrícolas e industriales en las zonas de oasis van en aumento (junto al crecimiento natural de la población), generando así sequías agrícolas y ecológicas.

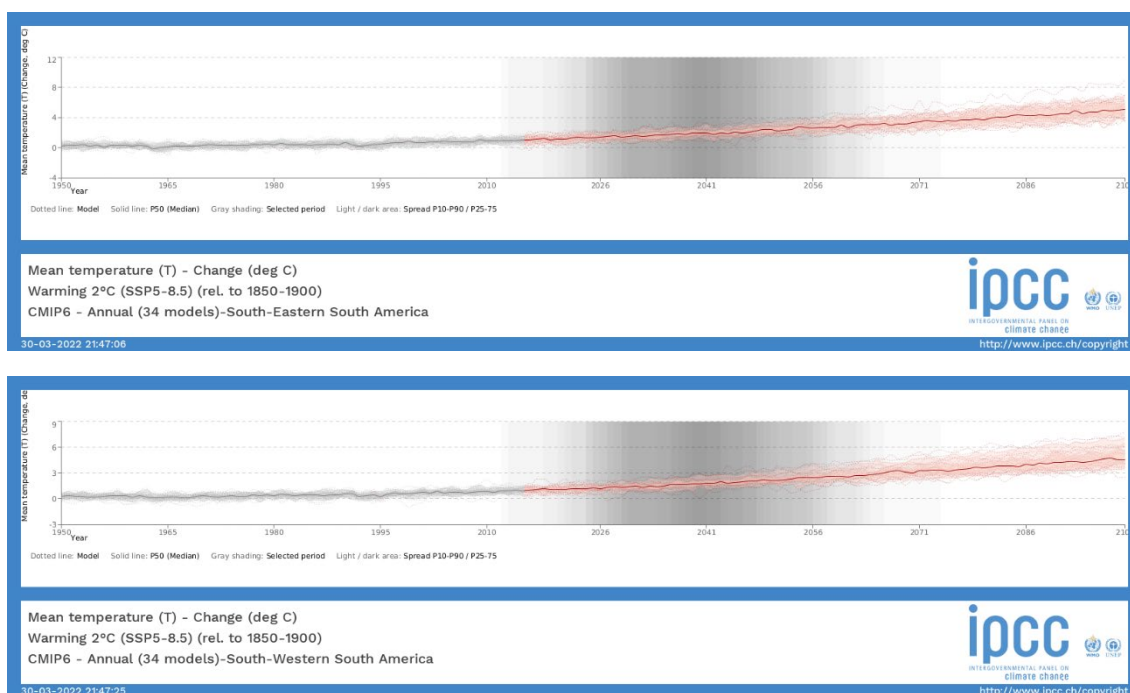


Figura 8. 9. Modelos CMIP6 sobre el pronóstico del cambio de la temperatura media (T °C) - Calentamiento 2°C con SSP5-8.5 (relativo al período 1850-1900) - Anual (34 modelos). Regiones: Sureste de Suramérica (SES) y Suroeste de Suramérica (SWS). Consultado de: Iturbide et al., (2021) y Gutiérrez et al., (2021).

Las temperaturas, como en la mayor parte del planeta, se espera que continúen en aumento progresivo y bajo los escenarios de adición de carbono a la atmósfera proyectados por el IPCC (Figura 8.9). Bajo estos escenarios inflexibles (fuera del alcance de la gestión local), la determinación y fluencia de los caudales ambientales hacia el sitio Ramsar quedan sujetos a la gestión de demanda de agua agrícola y doméstica en la zona de oasis.

Los humedales de zonas áridas son ambientes particularmente susceptibles a la degradación. Los ingresos de agua al sistema generalmente llegan desde afuera del sistema (p. ej., escorrentía) y contribuyen al delicado balance entre las demandas ecológicas del humedal en sí, incluyendo a la elevada evaporación. En este sentido, bajo escenarios de disminución de escorrentía y aumento de la temperatura y, por ende, la evapotranspiración potencial, los ecosistemas y sociedades involucrados dentro del área de influencia del humedal entran en situación de riesgo.

Si para la existencia del humedal debe prevalecer el balance hídrico mencionado, el establecimiento de escenarios de cambio climático sólo deja la alternativa de la gestión de los recursos hídricos, de modo que el consumo y aprovechamiento humano sea acorde a la realidad de la región y del momento.

Sean humedales de zonas áridas, húmedas o costeras, estas zonas representan uno de los ecosistemas más valiosos del planeta. Algunas palabras de la secretaria general de la Convención Ramsar sobre Humedales – Martha Rojas Urrego (Ramsar, 2019b) sobre los humedales y el cambio climático indican:

“La ciencia es clara. Los humedales son los sumideros de carbón más efectivos sobre nuestro planeta”.

Sobre esta frase, también recalca el reconocimiento del Acuerdo Climático de París sobre el rol de los humedales para limitar la cantidad de carbón emitido a la atmósfera, clave en mantener el calentamiento global por debajo de los 2 °C.

Si bien se conoce y valora el rol de los humedales en la lucha contra el cambio climático, más de una tercera parte de su superficie se ha perdido en sólo 45 años, cuyo porcentaje pudiese aumentar producto de la acción humana y del mismo cambio climático.

Las últimas palabras de la intervención de Rojas Urrego fueron:

“Todos podemos contribuir en revertir la pérdida de los humedales, así podemos continuar beneficiándonos de los servicios esenciales que proveen a la naturaleza y la sociedad. Tenemos las soluciones. Solo necesitamos voluntad y acción. No estamos incapaces frente al cambio climático”.

La entrevista oral completa puede consultarse desde: <https://www.ramsar.org/news/wetlands-and-climate-change>

A continuación, parte del póster conmemorativo por el Día Mundial de los Humedales (Figura 8.10) del 2 de febrero de 2022 (Ramsar, 2022).



Figura 8. 10. Los Humedales, un llamado a la acción. Consultado de: Ramsar (2022).

CONCLUSIÓN

Si bien desde 2007 existe un marco regulatorio sobre caudales ambientales, en el año 2018 la Declaración de Brisbane y la Agenda de Acción Global establecieron una visión común y aceptada en cuanto al reconocimiento, instauración, protección y mantenimiento de los caudales ambientales.

Las diversas recomendaciones, en conjunto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, permiten establecer acciones que, desde el liderazgo, manejo e investigación, aseguren el flujo de estos caudales. Los beneficios del logro de estos objetivos no sólo ayudarían a la restauración de ecosistemas degradados, sino que también, indirectamente, asegurarían mejores condiciones de vida para sus habitantes, así como mayores perspectivas de desarrollo económico sostenible.

Si bien la implementación de estos objetivos pasa por un proceso complejo, de profundo compromiso social, económico y gubernamental, representa por sí mismo un mecanismo de presión estricto que no se detiene. Su vigencia temporal está marcada por las características locales de cada lugar, así como por el nivel de degradación ambiental y las complejidades socioeconómicas regionales.

En este sentido, el sitio Ramsar de estudio no sólo podría verse beneficiado por la implementación de estos objetivos, sino que también el mejoramiento de calidad de vida de sus poblaciones permitiría una mayor patrimonialización y territorialización de los espacios degradados. Para esta región, las complejidades son actuales e históricas, y su origen parte de la ineficiencia de uso del recurso hídrico en los oasis y las condiciones climáticas locales.

De esta forma, las acciones para restituir y hacer cumplir los objetivos de los caudales ambientales no sólo deben focalizarse en el uso eficiente y racional del agua en los oasis, sino que también deben incluir los escenarios y pronósticos aceptados sobre el cambio climático. En el último informe del IPCC (2021) y en general se estiman mayores temperaturas, aumento en la severidad de sequías y disminución de permahielos, nieves y glaciares, incluyendo, por consiguiente, menor volumen de escorrentías.

Considerando al cambio climático como un proceso (hasta la fecha) irreversible, las acciones deben partir desde la matriz productiva de la región, basada en un marco legal sólido. En este sentido y para lograr los objetivos, es imprescindible un reconocimiento amplio y social del problema (concienciación), con el fin de cambiar la visión de espacio olvidado del sitio Ramsar, a un territorio productivo, cuyo patrimonio social y natural merece ser restaurado, protegido y mantenido en el tiempo.

REFERENCIAS

Argentina.gov.ar. (2022). Qué son los ODS. Consejo Nacional de Coordinación de Políticas Sociales. Presidencia de la Nación. Consultado de: <https://www.argentina.gov.ar/politicassociales/ods/institucional/queson>

Argentina.gov.ar. (2022b). Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Consejo Nacional de Coordinación de Políticas Sociales. Presidencia de la Nación. Consultado de: <https://www.argentina.gov.ar/politicassociales/ods/institucional/17objetivos>

Arias, P. Bellouin, E. Coppola, R. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M.D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P.W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R.P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J.G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W.D. Collins, S.L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F.J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F.J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J.S. Fuglestedt, J.C. Fyfe, N.P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J.M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H.T. Hewitt, P. Hope, A.S. Islam, C. Jones, D.S. Kaufman, R.E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J.-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T.K. Maycock, M. Meinshausen, S.-K. Min, P.M.S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A.C. Ruane, L. Ruiz, J.-B. Sallée, B.H. Samset, S. Sathyendranath, S.I. Seneviratne, A.A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A.-M. Tréguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang y K. Zickfeld. (2021). Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Arthington, A. (2018). Environmental Flow Concepts and Holistic Applications in River Basin Governance. *Ecology, Economy and Society—the INSEE Journal* 1 (2): 73–76, July 2018. Doi: <https://doi.org/10.37773/ees.v1i2.37>

Arthington, A. Bhaduri, A. Bunn, S. Jackson, S. Tharme, R. Tickner, D. Young, B. Acreman, M. Baker, N. Capon, S. Horne, A. Kendy, E. McClain, M. Poff, N. Richter, B. y Ward, S. (2018). The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows. *Front. Environ. Sci.* 6:45. Doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.201800045>

Gutiérrez, J. Jones, G. Narisma, L. Alves, M. Amjad, I. Gorodetskaya, M. Grose, N. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk y J.-H. Yoon. (2021). Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge

University Press. In Press. Interactive Atlas available from Available from <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2021b). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2021c). Regional fact sheet – Central and South America. Sixth Assessment Report. Working Group I – The Physical Science Basis.

Iturbide, M. Fernández, J. Gutiérrez, J.M. Bedia, J. Cimadevilla, E. Díez-Sierra, J. Manzanar, R. Casanueva, A. Baño-Medina, J. Milovac, J. Herrera, S. Cofiño, A.S. San Martín, D. García-Díez, M. Hauser, M. Huard, D. y Yelekçi, Ö. (2021) Repository supporting the implementation of FAIR principles in the IPCC-WG1 Atlas. Zenodo. Doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3691645>. Consultado de: <https://github.com/IPCC-WG1/Atlas>

O'Donnell, E. Horne, A. Godden, L. y Head, B. (2019). Cry me a river: building trust and maintaining legitimacy in environmental flows. Australasian Journal of Water Resources. Doi: <https://doi.org/10.1080/13241583.2019.1586058>

Organización de las Naciones Unidas, ONU. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Proyecto de resolución remitido a la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015 por la Asamblea General en su sexagésimo noveno período de sesiones. Asamblea General de las Naciones Unidas. A/70/L.1. Consultado de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/transformar nuestro mundo documento oficial de la agenda 2030 original.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/transformar_nuestro_mundo_documento_oficial_de_la_agenda_2030_original.pdf)

Ramsar. (2019). Los humedales: la clave para hacer frente al cambio climático. Convención sobre los humedales. Consultado de: https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/wwd19_handout_s.pdf

Ramsar. (2019b). Wetlands and Climate Change. Statement by Martha Rojas Urrego, Secretary General of the Ramsar Convention on Wetlands “Wetlands: A

natural solution to climate change". Consultado de: <https://www.ramsar.org/news/wetlands-and-climate-change>

Ramsar. (2022). Los Humedales, un llamado a la acción. Infografía conmemorativa por el día mundial de los humedales. 2 de febrero de 2022. Consultado de: <https://www.worldwetlandsday.org/es/material#>

Tharme, R. Jackson, S. Douglas, M. Anderson, E. y Flotemersch, J. (2018). Rivers, Flows and People - Connecting Ecosystems with Human Communities, Cultures and Livelihoods. 3rd International Conference: Integrative sciences and sustainable development of river. Consultado de: https://www.researchgate.net/publication/336406412_Rivers_Flows_and_People_-_Connecting_Ecosystems_with_Human_Communities_Cultures_and_Livelihoods_Des_rivieres_et_des_hommes_relier_les_ecosystemes_et_les_communautes_humaines

United Nations development Programme, UNDP. (2015). The Sustainable Development Goals (SDGs). Consultado de: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>

Valdés, Y. (2018). A 10 años de la declaración de Brisbane: mirada a los caudales ecológicos y ambientales. Ingeniería Hidráulica Y Ambiental, Vol. XXXIX, No. 2, May-Ago 2018, p. 16-30. Consultado de: <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/441>

Wineland, S. Basagaoglu, H. Fleming, J. Friedman, J. Garza-Díaz, L. Kellogg, W. Koch, J. Lane, B. Mirchi, A. nava, L. Neeson, T. Ortiz-Partida, J. Paladino, S. Plassin, S. Gomez-Quiroga, G. Saiz-Rodriguez, R. Sandoval-Solis, S. Wagner, K. Weber, N. Winterle, J. y Wootten, A. (2021). The environmental flows implementation challenge: Insights and recommendations across water-limited systems. WIREs Water. 2022:9. e1565. Doi: <https://doi.org/10.1002/wat2.1565>

Xi, Y. Peng, S. Ciais, P. y Chen, Y. (2020). Future impacts of climate change on inland Ramsar wetlands. Nature Climate Change 11, 45–51 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00942-2>

Capítulo IX

CONCLUSIONES

Una de las principales características del área de estudio es que representa el oasis natural de la región, es decir, una zona de confluencia aluvial, humedales y bañados en medio de una zona árida. Los antiguos pobladores entendieron su valor y fue el área poblada desde hace siglos. El desarrollo y el paso del tiempo hicieron migrar ese oasis natural y lo multiplicaron en tres de origen artificial, cuyo abastecimiento hídrico despojó al original de sus fuentes de agua.

Hoy en día, la degradación del sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero se atribuye principalmente a la sobreexplotación del agua en los oasis y el uso desmedido que ignora a las demandas hídricas ambientales. La figura de sitio Ramsar permitió darle importancia internacional y protección a una zona ya afectada desde hace décadas.

Bajo esta problemática, los caudales ambientales y su implementación aseguran la afluencia de agua al sitio de interés, no sin esto encarar un costo que difícilmente pueda asumirse. Por esta razón, los caudales ambientales representan un objetivo ideal sobre una realidad cambiante y muchas veces poco dispuesta a ceder lo que los ecosistemas demandan.

La línea de investigación de este trabajo partió desde el análisis de los vínculos sociedad-naturaleza en la zona, el reconocimiento de las condiciones climáticas y su variabilidad, la determinación de caudales ambientales mediante diversas metodologías hidrológicas, el análisis del balance hídrico regional y las medidas que deberían aplicarse sobre la base de la declaración de Brisbane de 2018 y el informe del IPCC (2021) sobre el cambio climático. En cada uno de los capítulos se explicó detalladamente las conclusiones de cada tema.

Integrando los conocimientos adquiridos en el sitio de estudio, se destaca que la degradación del sitio Ramsar no sólo afecta el ámbito ecológico, sino que también aqueja a las sociedades que lo habitan y las culturas y tradiciones que los unen. Dentro de esta relación sociedad-naturaleza, desequilibrada por la ausencia del agua, el desajuste proviene del exterior (oasis), para detrimento de las sociedades pequeñas y ecosistemas de humedales aguas abajo.

La rica cultura asociada a las lagunas y aún perenne en los pocos pobladores de la zona es amenazada por la desarticulación de los territorios y la despatrimonialización de los mismos. De esta forma, la emigración y la falta de oportunidades limitan el crecimiento económico del sitio Ramsar. Por esta razón, asociaciones gubernamentales y organizaciones no gubernamentales ejercen acciones locales, con el fin de remediar espacios y brindar oportunidades para que los pobladores y sus culturas puedan ser mantenidos en el tiempo. Muchas de las asociaciones de acción y trabajo local han entendido que difícilmente el agua vuelva a través de los cauces, por lo que han emprendido trabajos de construcción de azudes pluviales, los cuales pueden remediar localmente problemas como desecación de humedales y erosión retrocedente.

Respecto a las características climáticas, la zona representa una de las regiones más secas del país. Su posición relativa al continente y la cordillera producen una aridez característica, representada por la alta concentración de precipitaciones, elevada variabilidad anual y mensual de lluvias y temperaturas y un marcado gradiente espacial de los mismos (de este a oeste y de sur a norte). Asimismo, se recalca la elevada demanda evapotranspirativa sobre la oferta pluviométrica, lo cual convierte a las escorrentías en la principal fuente de agua.

Los análisis de la variabilidad hidroclimática (considerando precipitaciones, temperaturas y caudales) mostraron las vinculaciones físicas del sitio Ramsar versus la variabilidad natural del clima, el régimen de escorrentía y las evidencias que arrojaron sobre los impactos de usos antrópicos aguas arriba de la zona de estudio. En este sentido, si bien el régimen térmico responde a una ventana de variabilidad anual, las precipitaciones y los caudales toman especial vinculación respecto a modos de variabilidad característicos de los fenómenos ENSO, MEI y PDO (sobre todo en estaciones de aforo aguas abajo de la cordillera).

Las tendencias de anomalías de las variables consideradas coinciden con los análisis derivados del informe del IPCC (2021), con tendencias de temperaturas y precipitaciones ligeramente crecientes (con prevalencia en la zona de planicies). En cuanto a los caudales, los resultados sugieren una influencia de los eventos ENSO, con tendencias negativas en estaciones de la cordillera.

Como parte del análisis multitemporal de la vegetación en el sitio Ramsar, el NDVI presentó mayor correlación positiva, temporal y espacial con los caudales en épocas estivales. Sin embargo, la relación inversa que existe con la precipitación y la disminución que se observa luego del año 2000 sugieren que la afluencia de menores escorrentías hacia el humedal está incidiendo negativamente sobre la actividad fotosintética de la zona. Dicha pérdida de relación NDVI-caudal presenta un gradiente espacial de aguas arriba a aguas abajo, indicando indirectamente la salud de los ecosistemas de humedales y la relación con las actividades antrópicas aguas arriba.

Dado el estado de los humedales y la relación que se evidencia respecto al NDVI estudiado, se analizaron diversas metodologías hidrológicas para obtener caudales ambientales. Si bien todos los resultados son bajo potencial uso e interpretación, los métodos de Caudal de Mantenimiento, propuesta de reforma a la Ley argentina N° 25688 y NGPRP (programa de las grandes llanuras septentrionales) resultaron como aquellos con mayor ajuste a las variabilidades observadas aguas arriba y superiores en magnitud en comparación con la estación de San Juan – El Encón (ELC) (situada dentro de la zona de estudio).

Por consiguiente, para objetivos ambientales de sistemas sensibles (como humedales de zonas áridas), se recomienda desestimar las metodologías basadas en porcentajes fijos de caudales anuales, priorizando así aquellas fundamentadas en caudales variables o porcentajes medios mensuales.

Adicionalmente y de acuerdo con el análisis de contraste entre las estaciones San Juan – km 101 (SJ1) y San Juan – km 47,3 (SJ4) (río San Juan), se constató

el impacto que las represas (para este caso, Los Caracoles) generan sobre las escorrentías. Así, se observó que no sólo los caudales son alterados en magnitud, sino también en frecuencia y ocurrencia.

Considerando que las metodologías de caudales ambientales no consideran las distancias entre el lugar objetivo y las fuentes de agua y que el sitio Ramsar se encuentra en promedio a 200 km desde las estaciones de aforo aguas arriba, se propuso una modificación de su cálculo que considerase estas distancias. En función de este parámetro, la propuesta se basó en calcular el agua infiltrada y evapotranspirada en cauce, con el fin de ser sumada al volumen de caudales ambientales. De esta forma, la sumatoria de las pérdidas a los hidrogramas supondría diferencias proporcionales que oscilan entre 33,6 % (San Juan – método del caudal de mantenimiento) hasta 138,9 % (Tunuyán – método de propuesta de modificación de la Ley argentina N° 25688).

Si bien son volúmenes de agua que presionan aún más a los objetivos de los caudales ambientales, su consideración e incorporación permitirían que el volumen calculado efectivamente alcance el lugar objetivo, sin que tenga que ser reducido naturalmente por las pérdidas en cauce.

Dentro del balance hídrico antrópico regional y en términos del déficit de agua para satisfacer las demandas ambientales, los resultados exponen diferencias (entre caudales ambientales por la Ley argentina N° 25688 y los balances) superiores a -150 % en Mendoza, alcanzando incluso los -825 % para Tunuyán y un máximo de 230 % para San Juan. Es decir, lo calculado mediante la metodología de caudales ambientales (Ley argentina N° 25688) es superior a lo que arrojan los balances hídricos locales (a excepción de San Juan, cuyo balance es ligeramente superior a los caudales ambientales calculados).

El balance negativo, superior incluso a caudales ambientales propuestos, confirma la hipótesis de trabajo, señalando a las actividades antrópicas (principalmente de agricultura irrigada) como la principal causa de degradación del sitio Ramsar. Lo anterior reitera que casi toda el agua disponible es destinada a fines socioeconómicos, dejando nulos o escasos volúmenes para satisfacer las demandas ambientales.

Cabe destacar que el problema sigue teniendo su origen en el uso desmedido del agua en los oasis, por lo que desde 2007 y con su modificación en 2018, la Declaración de Brisbane y la Agenda de Acción Global establecieron una visión común y aceptada en cuanto al reconocimiento, instauración, protección y mantenimiento de los caudales ambientales. Las diversas recomendaciones, en conjunto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, permiten establecer acciones que, desde el liderazgo, manejo e investigación, aseguren el flujo de estos caudales. Los beneficios del logro de estos objetivos no sólo ayudarían a la restauración de ecosistemas degradados, sino que también, indirectamente, asegurarían mejores condiciones de vida para sus habitantes, así como mayores perspectivas de desarrollo económico sostenible.

En este sentido, el sitio Ramsar de estudio no sólo podría verse beneficiado por la implementación de estos objetivos, sino que también el mejoramiento de calidad de vida de sus poblaciones permitiría una mayor patrimonialización y territorialización de los espacios degradados. De esta forma, las acciones para restituir y hacer cumplir los objetivos de los caudales ambientales no sólo deben focalizarse en el uso eficiente y racional del agua en los oasis, sino que también deben incluir los escenarios y pronósticos aceptados sobre el cambio climático. En el último informe del IPCC (2021) y en general, se estiman mayores temperaturas, aumento en la severidad de sequías y disminución de permahielos, nieves y glaciares, incluyendo, por consiguiente, menor volumen de escorrentías.

Considerando los efectos casi irreversibles del cambio climático, la región se enfrenta a una realidad que no considera al sitio Ramsar y oasis natural de la zona. La mayoría de la población (asentada en los oasis irrigados) tiene poca conciencia de lo que ocurre en el secano (zonas aguas abajo), ya que la matriz productiva de la región depende de la producción agrícola, posible a su vez por la irrigación. Es de esta forma como ha sucedido un ecocidio pasivo a lo largo de las décadas, a costa de la riqueza agrícola de la región. De esta forma, destinar agua para satisfacer las demandas ambientales del sitio Ramsar implicaría un detrimento económico significativo que posiblemente las sociedades no estén dispuestas a afrontar.

Como recomendación generada desde este trabajo de investigación, la consideración e instauración de los caudales ambientales debe partir desde la conciencia ciudadana y la visibilización del problema. Asimismo, las sociedades pueden presionar a las instituciones competentes para ejercer acción primaria desde dos flancos:

1. Tecnificación del uso del agua, lo cual permitiría que el recurso no se desperdicie por infiltración y evaporación (p. ej., irrigación por surcos) y pueda existir un superávit que se destine a satisfacer demandas ambientales aguas abajo.
2. Consideración y planteamiento de un marco legal robusto, el cual establezca volúmenes de caudales ambientales significativos en términos inflexibles. Lo anterior obligaría a la matriz agrícola e industrial a manejar más eficientemente el recurso hídrico de acuerdo con la oferta de agua considerada.

Bajo escenarios de cambio climático, donde los humedales son apreciados como grandes sumideros de carbono, la conservación de espacios naturales como el sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero representa a su vez la conservación de un espacio patrimonial, de gran valor ecológico y de importancia para la integración de la región. Sólo mediante el reconocimiento de su importancia socioambiental y a través de los beneficios de implementación de los caudales ambientales, la región podría enfrentar una productiva etapa de restauración de humedales, cuyos beneficios se extienden no sólo a ámbitos ecológicos y sociales locales, sino también globales en la lucha contra la desertificación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático.