

LOS DESAFÍOS DEL AGUA PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS EN LA ARGENTINA DEL SIGLO XXI

**Miguel A. Blesa, Raúl Lopardo, Jorge Marcovecchio, Alberto Piola y Ricardo
Villalba**

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

1. Introducción

Los acelerados cambios demográficos en la Argentina y el mundo, caracterizados por un aumento de la esperanza de vida al nacer, una marcada disminución de la tasa de natalidad hasta valores inferiores a la tasa de reposición, migraciones hacia centros urbanos, y migraciones transfronterizas muchas veces forzadas, van acompañados por fuertes cambios en las distribuciones poblacionales. En ese contexto los asentamientos humanos tienen una necesidad cada vez más acuciante de disponer de agua en cantidades adecuadas, que eviten los excesos y defectos hídricos. La distribución poblacional de la Argentina, o de cualquier otro país, está en buena medida moldeada por la disponibilidad de agua. Si bien las migraciones que han ocurrido a lo largo de la historia en pequeña o en gran escala obedecieron a múltiples razones (políticas, económicas, etc.), también es una razón de peso la degradación del hábitat, ya sea por la sobreexplotación humana, o por fenómenos naturales. Por ello, también es motivo de migraciones el crecimiento poblacional hasta alcanzar situaciones en las que la capacidad del ambiente para soportar las mismas se satura.

De los factores ambientales, la escasez o el exceso de agua es uno de los más importantes en determinar la decisión de migrar o asentarse en un determinado lugar. Los asentamientos humanos requieren de agua para diversos fines, entre los que se cuentan la agricultura, la industria, la generación hidroeléctrica, el consumo doméstico, el transporte, la pesca y la recreación. De una forma u otra, todos estos usos son fundamentales para facilitar, o en caso contrario dificultar el asentamiento de seres humanos en el territorio.

El cambio climático está afectando fuertemente el ciclo hidrológico, y con ello la disponibilidad espacio-temporal de agua. La frecuencia de eventos extremos se ve incrementada, y el calentamiento global está afectando a los hielos continentales y al nivel de las aguas del mar. Los grandes cambios que se están manifestando hacen posible, e incluso probable, que la segunda mitad del siglo XXI sea testigo de

migraciones internas debidas a los cambios en la disponibilidad del recurso agua, a la alteración del territorio por las inundaciones más frecuentes y al aumento del nivel del mar en poblaciones costeras.

El último informe del IPCC en su Capítulo 4, “Agua”, dice:

“Los aumentos previstos en los extremos hidrológicos plantean riesgos cada vez mayores, con una posible duplicación de posibilidad de inundaciones entre 1,5°C y 3°C de calentamiento y un aumento estimado de entre 120% y 400% de la población en riesgo por inundaciones a causa de mayores caudales de ríos entre 2°C y 4°C, respectivamente.”

“Se prevé que los cambios hidrológicos inducidos por el clima aumentarán la migración de habitantes en la última mitad del siglo, con un aumento de casi siete veces el número de solicitantes de asilo en países de la Unión Europea. El número de desplazados internos en África subsahariana, Asia meridional y América Latina aumentó casi cinco veces con respecto a estimaciones anteriores”.

“El Centro de Monitoreo de Desplazamientos Internos (IDMC) estima que cada año se producen un promedio de doce millones de nuevos desplazamientos debido únicamente a sequías e inundaciones. A finales de 2020, había siete millones de personas desplazadas debido a desastres naturales, incluidas sequías e inundaciones. Además, la inseguridad hídrica en los hogares también ha sido señalada como un factor de migración, dados sus efectos socioeconómicos y de salud física y mental”.

2. La población, la geografía y el recurso hídrico

La superficie de la parte continental americana de la República Argentina es de 2.791.810 km². El 76% del territorio es árido o semiárido, con precipitaciones medias menores a 800 mm anuales. En las provincias patagónicas las precipitaciones son en general menores a 200 mm anuales, excepto en algunas franjas contiguas a la cordillera de los Andes. En la región oriental del centro y norte del país las precipitaciones son abundantes, superiores a 1.000 mm.

El caudal medio anual de la oferta del recurso hídrico es del orden de 26.000 m³/s, o 17.825 m³/año por habitante, muy superior al umbral de estrés hídrico de 1.700 m³/habitante/año. Sin embargo, la distribución espacial del recurso hídrico tiene muy fuertes asimetrías. El 85% del agua superficial del país corresponde a la cuenca del río de la Plata, donde se encuentra la mayor concentración de su población y actividad

productiva. En el otro extremo se sitúan las provincias áridas y semiáridas, con cuencas de escasa pluviosidad y menos del 1% del total del agua superficial.

En cuanto al agua subterránea, un 30% del agua utilizada tiene ese origen. Han sido relevados importantes acuíferos utilizables en el país, con alto grado de conocimiento en algunos casos, como en las provincias de San Juan y Mendoza, en las que se depende fuertemente de ellos. El Sistema Acuífero Guaraní, que se encuentran en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay a distintas profundidades en una importante extensión de la Cuenca del Plata, es probablemente una de las más importantes reservas de agua dulce del mundo.

El Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas de 2022 registra un total 46.044.703 habitantes. La densidad media es de 16 habitantes/km². La distribución es también muy desigual, pues el 70% de la población se localiza en la zona húmeda y sólo el 6% en la región árida. En 2023 alrededor del 92% de la población habitaba en centros urbanos de más de 10.000 habitantes. El 80% de la población de Argentina cuenta con conexión domiciliaria a una red de agua potable y sólo 47% posee conexión domiciliaria a red de cloacas sanitarias, proporción que se amplía sustancialmente cuando se consideran sistemas de saneamiento mejorado. Solamente el 12% de las aguas residuales recolectadas son tratadas antes de su vuelco a los cuerpos hídricos receptores.

Se estima que el promedio nacional de producción de agua potable por habitante es de 400 litros/día con un amplio rango de variación entre las provincias, que va desde un máximo de 650 litros/habitante/día en San Juan hasta un mínimo de 170 litros/habitante/día en La Pampa. El agua no contabilizada es uno de los principales problemas de eficiencia en los servicios de agua potable. Se calcula que las pérdidas en la red y la subfacturación por conexiones clandestinas y desactualización de los catastros de usuarios, representan entre 35% y 45% del agua producida. Por ese motivo, se calcula que el consumo promedio en la Argentina se encuentra alrededor de los 250 litros/habitante/día, pero con máximos de hasta 400 litros/habitante/día. Este alto nivel de consumo, comparado con el de numerosos países del mundo y en particular de América Latina, en buena parte se explica por el bajo grado de “micromedición” de los consumos, sobre todo en la mayoría de los servicios de las grandes ciudades, donde los regímenes tarifarios domiciliarios no se basan en la medición del consumo. Según

antecedentes internacionales, el consumo medio de los sistemas que operan con micromedición generalmente se encuentra por debajo de los 200 litros/habitante/día.

La crisis del agua es principalmente una crisis de gobernanza. Los siguientes temas son centrales para la gestión, con visión de mediano plazo:

El uso eficiente del agua en la agricultura, destino más importante del recurso, que crecerá más aun por la demanda de alimentos. Argentina es un gran exportador de alimentos, y por ello un gran “exportador de agua”.

La contaminación, puntual o difusa, de las aguas superficiales.

La gestión eficiente del recurso hídrico, en el marco del ordenamiento territorial. La elevada presión poblacional, fuente de descontrol en la gestión se suma a la superposición de entidades para el desarrollo de programas y proyectos y de instituciones de control de calidad de agua.

Los aspectos jurisdiccionales, ya que el Art. 94 de la Constitución Nacional señala que los recursos naturales (y el agua es uno de ellos) son propiedad de cada provincia, por lo que existen normas diferentes para casos similares en distintos sitios del país.

Las catástrofes por excesos hídricos: inundaciones por lluvias extremas en zonas urbanas densamente pobladas, inundaciones de poblaciones y campos cultivados por desborde de ríos, y procesos de erosión en zonas de pendientes abruptas.

Las sequías extremas, que generan problemas de abastecimiento en zonas áridas y semiáridas y comprometen la producción agrícola y ganadera en gran parte del país.

El limitado aprovechamiento de los recursos hidroenergéticos, en comparación con otros países de la región. No se aprovecha cabalmente el potencial existente.

La necesidad de proveer más y mejor educación a la población en particular de los habitantes de zonas vulnerables. El tratamiento periodístico de estos temas está más interesado en el impacto mediático que en la concientización social.

El problema irresuelto de la pobreza de gran parte de la población periurbana, cuyos déficits en salud y educación se transfieren a problemas en el nivel educativo y en el incremento de riesgo por eventos extremos.

La cantidad y calidad de las aguas subterráneas. Por desconocimiento, pueden estar siendo sobre explotadas o puede ignorarse la presencia de arsénico, flúor u otros

contaminantes. El agua subterránea debería utilizarse en caso de que no haya otras fuentes disponibles y sólo extrayendo un caudal no mayor que la recarga.

3. La ingeniería hidráulica y el ambiente

Durante los últimos cuarenta años se han realizado esfuerzos para aumentar la conciencia pública sobre la necesidad de proteger el planeta contra la degradación ambiental. Por sus requerimientos opuestos el agua para el desarrollo puede chocar con la conservación del medio ambiente. La protección de la vida humana y la mejora del nivel de vida requieren obras de ingeniería que, a su vez, pueden alterar la integridad de los ecosistemas naturales. Es pues una encrucijada en la que se debe decidir si construir más estructuras para satisfacer las crecientes necesidades de vivienda, alimentos y agua o priorizar la protección ambiental frente a la degradación que pueden causar algunas de estas estructuras.

Los proyectos de inversión deben buscar desarrollar el entorno para mejorar la vida de los seres humanos y la calidad del entorno. Este fin no siempre se cumplió ya que no se tomaron medidas para evitar que el ecosistema y a veces el propio entorno social se degradaran. Los proyectos de inversión deben incluir beneficios sociales y conservación del ambiente para lograr el desarrollo sostenible. La ingeniería tiene una responsabilidad ineludible e intransferible en la ejecución técnica de los proyectos de inversión y juega un papel protagónico en los estudios de impacto ambiental, especialmente en el ámbito hidráulico. Según el enfoque holístico que se utiliza para caracterizar el ambiente, el agua debe analizarse como un sistema global formado por muchos componentes interrelacionados o que están vinculados con el medio natural y el medio social. Para este objetivo, los ingenieros necesariamente deben trabajar con especialistas en otras disciplinas.

La ingeniería hidráulica ha aportado grandes beneficios a la sociedad, por ejemplo, desarrollando zonas desérticas o proporcionando energía limpia y económica. Este importante aporte puede verse empañado por lamentables accidentes relacionados con estructuras hidráulicas que ponen en riesgo asentamientos humanos, alteran el medio ambiente y generan gastos contingentes. Estos aspectos no sólo están asociados a grandes represas, puertos o vías navegables, sino también a pequeños proyectos de obra mal diseñadas que han podido afectar gravemente a la población y al medio ambiente. Hay muchos ejemplos de fallas en pequeñas obras que produjeron impactos negativos en las actividades de los pobladores aledaños e incluso estimularon a la gente a emigrar.

El mayor impacto ambiental posible de una obra hidráulica es su propia destrucción. Más del 50% de los puentes destruidos en los Estados Unidos de América hasta la década de 1980 tuvieron como motivo fallas hidráulicas. El total de puentes caídos por terremotos, tifones, errores de cálculo estructural, cimientos defectuosos, accidentes y ataques terroristas es menor que el de los que fallaron porque fueron mal concebidas como “estructuras hidráulicas”.

También existen muchas obras hidráulicas que no corren riesgo de ruptura, pero tienen errores de diseño que les impiden operar de la manera en que fueron planeadas originalmente. En ocasiones, los ingenieros no han tenido en cuenta los aspectos ambientales, como factores decisivos en la concepción general de las estructuras hidráulicas y las presas no resultaron totalmente positivas para la sociedad que las financiaba. Sin embargo, y a pesar de frecuentes opiniones negativas de los ecologistas y otras partes interesadas, numerosas presas tienen un comportamiento excelente o no se construyeron equivocadamente.

Resulta obvio que no pueden construirse obras de gran porte sin que se afecte en alguna medida el medio natural y también el medio social. Por caso, el desplazamiento de poblaciones debe ser tratado con un cuidado especial, con sentido de la organización y con sensibilidad política. La planificación de las obras debe complementarse con serios estudios sociales completos. Para estas poblaciones, su reinstalación debe significar de manera ineludible una mejora en su nivel de vida, puesto que los afectados directamente por el proyecto deben ser los primeros beneficiarios. En tal sentido, se deberá prestar especial atención a los grupos étnicos más vulnerables.

4. Tres casos de estudio

Para ilustrar la importancia del recurso agua para los asentamientos humanos, hemos elegido tres temas apreciablemente distintos: el problema de las inundaciones en los asentamientos urbanos; los asentamientos humanos en las tierras secas del oeste argentino; y el cambio climático y los fenómenos de contaminación en el Mar Argentino.

El problema de las inundaciones en los asentamientos urbanos

Las migraciones internas (y también externas), fueron transformando a la Argentina de un país mayormente rural en los comienzos del siglo XX en un país altamente urbanizado en la actualidad. Este proceso de urbanización se hizo generando

asentamientos humanos que invadieron valles de inundación, e incluso los cauces mismos de ríos y arroyos entubados. La consecuencia inevitable fue la ocurrencia de episodios de anegamiento, a veces independientemente de la magnitud de las precipitaciones.

Desde la fundación de Buenos Aires la expansión de la mancha urbana nunca se detuvo (ver Figura 1). En la actualidad aproximadamente el 30% de la población total del país vive en el AMBA.

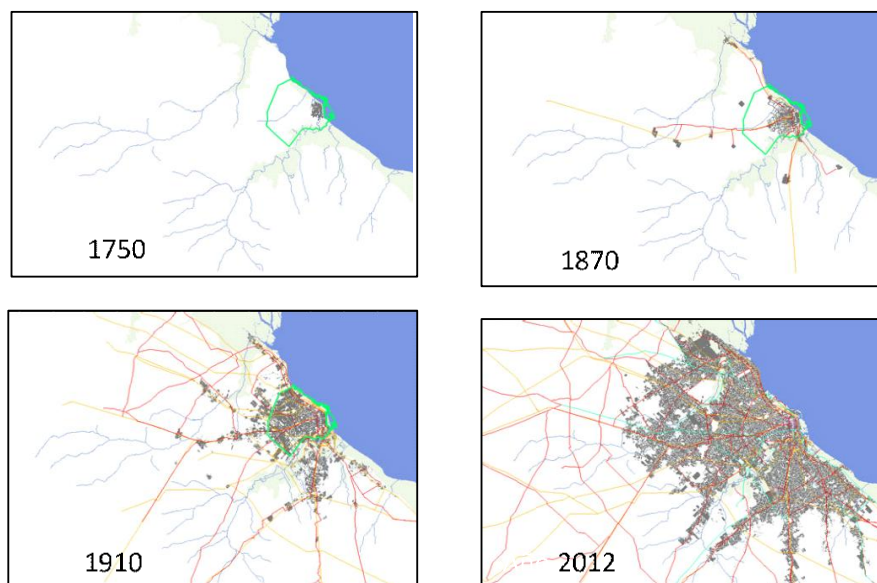


Figura 1. Evolución de la mancha urbana del gran Buenos Aires desde 1750 hasta 2011. El proceso no se ha detenido después de 2012.

La ciudad de Buenos Aires se asienta sobre once cuencas que originalmente drenaban sus excedentes hacia cauces natural hoy entubados y fuertemente urbanizados; las principales son las de los arroyos Medrano, Maldonado y Vega (todos entubados en CABA) y a ellos se asocian las principales zonas de riesgo de inundaciones.

El cambio climático y el calentamiento global aumentaron significativamente el riesgo hídrico de las regiones vulnerables. La temperatura media de la superficie terrestre entre 2011 y 2020 fue 1,1°C más alta que la temperatura promedio del siglo XIX (antes de la revolución industrial) y más alta que en cualquier momento en los últimos 100.000 años, Los modelos climáticos del IPCC ya están evaluando incrementos de temperatura de hasta 4°C en lo que resta del siglo. Ese incremento de temperatura provocará que aumente a más del doble la población expuesta a inundaciones en América del Sur y Centroamérica.

En la Argentina en general, y en el entorno del Gran Buenos Aires en particular, se han registrado incrementos significativos de las precipitaciones máximas anuales y diarias. Para el caso de la ciudad de Buenos Aires y su entorno se observa un incremento de casos en los que se registraron en un día precipitaciones superiores a 100 mm. Esta situación se repitió en muchas ciudades ribereñas, y algunas de ellas experimentaron precipitaciones catastróficas (Santa Fe, 400-500 mm en 24 horas, en 2003 y 2007; La Plata, 390 mm en 24 horas en 2013).

Por otra parte, el río de la Plata está experimentando un incremento de su nivel medio, mayormente motorizado por el aumento del nivel medio del mar. Ese aumento fue del orden de 17 cm para el siglo XX, de los que el 50% se produjo en las últimas tres décadas. Estos procesos de anegamiento e inundaciones traen aparejados severos problemas económicos, sociales y ambientales. Entre ellos está el desplazamiento de un número importante de pobladores de terrenos inundados. Su posterior retorno a las tierras inundables garantiza la repetición cíclica del problema de los evacuados. Además, las áreas en las que se registra mayor frecuencia de inundación suelen estar habitadas por población económicamente muy vulnerable.

Ya se mencionó la lluvia torrencial que castigó a la ciudad de La Plata, construida directamente sobre los valles de inundación de tres arroyos cuya geomorfología marcó el desarrollo de una severa inundación el día 2 de abril de 2013. Como en otros casos, los asentamientos más vulnerables a la inundación fueron los más precarios.

En los 60 km lindantes con el río de la Plata que van de Buenos Aires a La Plata viven más de tres millones de personas en zonas inundables. Las zonas de mayor riesgo son las de las cuencas de los arroyos Sarandí, Santo Domingo y Jiménez.

El alto grado de urbanización de la Argentina, en tendencia aún creciente, obliga a pensar la planificación urbana no solo sobre la base de obras de conducción y retención de los cursos de agua, sino que también se deben realizar una planificación urbana que tenga en cuenta el riesgo hídrico y los aspectos socio-culturales de la población. Dicha planificación debe contemplar:

- Usos del suelo (deforestación, pérdida de cobertura vegetal, etc.)
- Definición de los límites de las zonas más vulnerables (informando a los gobiernos de provincias y municipios, como así también a la población que habita sectores inundables, sobre los riesgos a los que se encuentran sometidos).

- Ordenamiento territorial (ocupación de áreas inundables y restricciones al dominio)
- Registro de eventos relevantes (a través de **redes de monitoreo** de agua superficial y freática)
- Información a los proyectistas (mediante elaboración y difusión de **cartas de duración, intensidad y frecuencia** de lluvias por región) para una correcta interpretación espacial y temporal de eventos extremos.
- Instalación y operación efectiva de sistemas de alerta acordes con los tiempos de respuesta de cada cuenca urbana o rural.
- Establecimiento de sistemas de seguros para determinadas zonas con cierta probabilidad de inundaciones.
- Elaboración de planes de contingencia para los casos inevitables de inundaciones urbanas, con la necesaria educación al respecto de los pobladores involucrados.
- Formación de comités de cuenca y autoridades técnicas de control para el **análisis y monitoreo global**, tratando cada cuenca en forma unitaria, superando límites políticos.
- Adopción del criterio de “drenaje cero” para todo nuevo emprendimiento de desarrollo urbanístico a proyectar, para preservar el estándar de la infraestructura existente.
- Revisión periódica de los planes de manejo de cuencas para adaptarlos a la evolución de la infraestructura y a los cambios de usos y del clima.

El cambio climático y los fenómenos de contaminación en el Mar Argentino.

En marzo de 2019 se reunió en Tokio el S20 (*Science 20*, integrado por las Academias Científicas de los países del G20) para considerar los principales problemas que afectaban al ambiente oceánico. Se identificaron tres macroprocesos como los más importantes: (1) los efectos del cambio climático; (2) la contaminación; y, (3) la sobrepesca. Si bien estos procesos tienen significativas variaciones regionales fueron considerados como los más críticos para el Océano Global.

El Mar Argentino es uno de los ecosistemas marinos más productivos del hemisferio sur y una región importante del Océano Atlántico Sudoccidental, que también está afectado por estos problemas y sufre diferentes efectos por estas causas. A diferencia de los productivos ecosistemas de surgencia, en el Atlántico sudoeste son importantes el efecto del viento y la intensa mezcla vertical promovida por la interacción de las corrientes de marea con el fondo cerca de la costa, y la Corriente de Malvinas en la plataforma exterior. La productividad del Mar Argentino se manifiesta en la abundancia de especies

desde el plancton hasta los predadores tope, incluyendo especies carismáticas de aves y mamíferos marinos importantes para la conservación, así como especies de interés comercial. La abundancia del fitoplancton contribuye a una intensa tasa de absorción de dióxido de carbono atmosférico. Estos factores resaltan la importancia de los servicios que brinda el ecosistema marino regional.

Varios factores vinculados al cambio climático pueden impactar en el funcionamiento de los ecosistemas marinos. El aumento de la temperatura, por ejemplo, puede conducir al aumento de la estratificación vertical, limitando el flujo de nutrientes hacia la superficie, y por ende el crecimiento del fitoplancton. El aumento de la temperatura también implica una disminución de la solubilidad de los gases, reduciendo la concentración máxima de oxígeno y de dióxido de carbono, entre otros. Los cambios en la dirección o intensidad del viento conllevan cambios en la circulación y en la magnitud de la mezcla vertical, modificando la profundidad de la capa de mezcla. Todos estos procesos tienen impactos biogeoquímicos y biológicos.

Durante las últimas cuatro décadas la temperatura media de la superficie del océano global aumentó 0,51°C. Pero el calentamiento es heterogéneo, con regiones donde la tendencia es mucho mayor a la media global. Por ejemplo, el calentamiento superficial en el Atlántico Sudoeste entre 30 y 50°S excede 0,72°C y en el Río de la Plata y la parte sur de la corriente de Brasil excede 1°C (ver Figura 2).

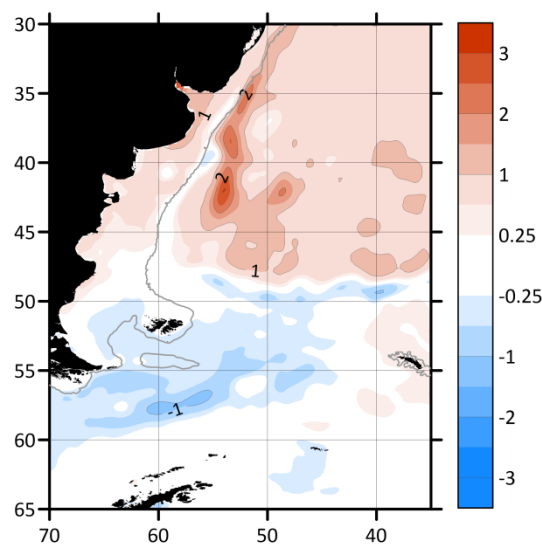


Figura 2. Variaciones de la temperatura de la superficie del mar (en °C) entre 1982 y 2019. Base de datos empleada: *NOAA 1/4° Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*. Los colores rojos representan regiones de calentamiento y los azules de enfriamiento. La línea gris es la isobata de 200 m, que separa la plataforma continental del océano profundo.

Esto es consistente con el aumento de la temperatura superficial observada en la porción polar de los anticiclones de latitudes medias en ambos hemisferios. Este proceso no se limitaría a la superficie, sino que se extendería sobre la capa superior del océano. El impacto del calentamiento sobre la distribución de las especies es complejo, pero existe creciente evidencia sobre alteraciones en los ciclos de vida y desplazamientos, tanto en ecosistemas terrestres como marinos. En la región norte del Mar Argentino se observa una tendencia al aumento de especies de interés pesquero de afinidad de agua cálida, lo que implica un potencial impacto socioeconómico debido a que los límites de extensión de los stocks se aproximan a fronteras geopolíticas.

En contraste, al sur de 50°S aproximadamente, presenta un enfriamiento moderado, alcanzando aproximadamente -0,5°C en las últimas décadas (Figura 2). Las tendencias positivas de la temperatura al norte de 50°S y al enfriamiento más al sur, son más intensas a partir de 2008. El enfriamiento al sur de 50°S durante la última década podría estar vinculado a la mayor frecuencia de vientos del sur observado en ese período.

Las observaciones satelitales revelan una tendencia positiva en la concentración superficial de clorofila en el Mar Argentino. El aumento es mayor en áreas más productivas, en particular sobre los frentes oceánicos, donde se ve favorecido el crecimiento del fitoplancton. Algunos estudios sugieren que la interacción de la Corriente de Malvinas con el fondo marino induce divergencia corriente abajo, la que es compensada por ascenso de aguas ricas en nutrientes. El proceso es consistente con la frecuente observación de pulsos de enfriamiento en el talud. Los modelos indican que la intensidad del flujo vertical es modulada por la intensidad de la Corriente de Malvinas. Sin embargo, no existe evidencia observacional de una tendencia de largo plazo en el transporte de la corriente. El aumento de la concentración de clorofila superficial en esa región podría ser una respuesta al aumento de la frecuencia de los vientos del sur.

Para analizar el impacto de diferentes contaminantes sobre los ecosistemas del Mar Argentino se deben considerar al menos dos sub-sistemas con funcionamientos distintos: (a) La zona costera y de plataforma próxima a la costa; y, (b) la zona de plataforma exterior y borde del talud continental. Hay mucha más información disponible para el primero que para el segundo.

En términos generales se puede caracterizar a las aguas del Mar Argentino como no impactadas o poco impactadas por contaminantes, pero en ambientes reducidos o en

regiones vinculadas a actividades particulares, las caracterizaciones pueden ser diferentes.

Procesos de contaminación en la zona costera del Mar Argentino. La, región costera puede dividirse en siete áreas con diferentes grados de impacto por sustancias potencialmente contaminantes. Las áreas (ordenadas de norte a sur) son: (a) Estuario del Río de la Plata, impactado por nutrientes inorgánicos y materia orgánica; hidrocarburos; compuestos orgánicos persistentes; metales traza; plásticos y microplásticos; contaminantes microbiológicos; contaminantes emergentes. Es el ambiente marino más severamente impactado del Mar Argentino. (b) Litoral marino de la Provincia de Buenos Aires, impactado por descargas urbanas, metales traza, hidrocarburos, y plásticos y microplásticos, todos con aportes puntuales. Esta zona se caracteriza como de bajo impacto, limitado a zonas puntuales. (c) Estuario de Bahía Blanca, impactado por materia orgánica; hidrocarburos; compuestos orgánicos persistentes; metales traza; plásticos y microplásticos; contaminantes microbiológicos. Se lo ha caracterizado como moderadamente contaminado, y hasta el momento no se han registrado efectos deletéreos sobre las poblaciones humanas asociadas. (d) Bahía de San Antonio y Golfo San Matías: se registran concentraciones variables de metales traza, y se han informado niveles variables de compuestos orgánicos persistentes en el Río Negro. Se la caracteriza como una región no impactada o de muy bajo impacto. (e) Golfo Nuevo: en este ambiente se registran bajos a medios niveles de metales traza e hidrocarburos. Se la caracteriza como una región no impactada o de muy bajo impacto. (f) Golfo San Jorge: hidrocarburos es el grupo de contaminantes más significativo, aunque también se detectan niveles variables de materia orgánica, metales traza, y mezclas de sustancias continentales descargadas por los ríos de la región. Esta zona se caracteriza como bajo a moderadamente contaminada. (g) Áreas marinas al este del Estrecho de Magallanes y costa de Tierra del Fuego: se detectan concentraciones bajas de metales traza e hidrocarburos. Se caracteriza como una región no impactada o de muy bajo impacto.

En todos los casos las fuentes que generan estos procesos son continentales y están ligadas a actividades humanas habituales (descargas de asentamientos urbanos e industriales, localización y operación de puertos y áreas de acceso a los mismos, desechos de actividades agropecuarias y agrícolas, actividades de minería y extracción de hidrocarburos, etc.) o eventuales (accidentes con derrames de sustancias peligrosas, incendios forestales que liberan sustancias retenidas en los suelos, etc.).

Procesos de contaminación en regiones de mar abierto. La información disponible sobre procesos de contaminación identificados en la plataforma continental y borde del talud del Mar Argentino es mucho menos abundante, y está principalmente ligada a estudios sobre hidrocarburos y plásticos o microplásticos. Se ha descrito la presencia, distribución y concentración de microplásticos -MPs- (microfibras y micropartículas, de hasta 5 mm) en agua y sedimentos de la plataforma central y externa de la región sud-bonaerense y nor-patagónica. La zona influenciada por la desembocadura del estuario de Bahía Blanca es la que presentó las mayores concentraciones; toda la plataforma estudiada presentó niveles detectables de MPs.

A lo largo de toda la plataforma continental del Mar Argentino, incluyendo áreas lejanas como la zona del Banco Namuncurá, al sur de Malvinas, la distribución de metales traza es muy heterogénea; las mayores concentraciones fueron registradas en el área de influencia del Río de la Plata, que fue identificada como un *hot spot* de metales.

En la plataforma central y externa de la región sud-bonaerense y nor-patagónica, y en la plataforma patagónica se encontraron concentraciones variadas de hidrocarburos, y las regiones más impactadas fueron la influenciada por la desembocadura del estuario de Bahía Blanca, y el Golfo San Jorge respectivamente.

En la plataforma continental sur patagónica (desde 42°S) y en la plataforma continental norte del Mar Argentino (desde la desembocadura del Río de la Plata hasta la latitud 42°S) los contaminantes más significativos son hidrocarburos y microplásticos, y estos últimos -sin dudas- son los contaminantes globales más críticos en este ambiente.

Los asentamientos humanos en las tierras secas del oeste argentino

No existen regiones del planeta donde la disponibilidad hídrica condicione más el asentamiento humano que en las tierras secas. La extensa región árida al pie de la Cordillera de los Andes que conforma el Gran Oeste Argentino no es una excepción. En respuesta a la circulación atmosférica hemisférica, existe una larga banda continental en América del Sur donde las precipitaciones, de origen atlántico-amazónico o Pacífico, llegan muy debilitadas. Estas regiones, orientadas de noroeste a sureste conforman la Diagonal Árida de América del Sur, a lo largo de la cual se localizan los desiertos costeros del Pacífico, las tierras secas en los Andes y sectores adyacentes, y las estepas patagónicas hasta alcanzar la costa atlántica. Allí, las precipitaciones rara vez superan

los 300 mm con periodos de varios meses sin precipitaciones. Los oasis irrigados del Gran Oeste Argentino se localizan a lo largo de esta banda de aridez.

Mediante el riego se transformaron porciones de tierras secas en espacios agrícolas y urbanos. Los oasis de la provincia de Mendoza albergan el 98% de la población y concentran la mayor parte de las actividades socioeconómicas en las áreas cultivadas bajo riego: viñedos, olivos, árboles frutales, hortalizas, forestación y sus industrias derivadas. Sin embargo, los oasis irrigados solo ocupan el 2,5% del territorio provincial si se consideran las superficies empadronadas y cultivadas regadas con agua superficial, y alcanzan el 4,8% si se tienen en cuenta las superficies sistematizadas para el cultivo, regadas con aguas superficiales y/o subterráneas, y las áreas antropizadas bajo riego. Con excepción de algunas actividades, como las relacionadas con la industria petrolera y la ganadería extensiva (principalmente caprina), la producción frutihortícola y vitivinícola se ubica totalmente en los oasis irrigados. Las capitales provinciales de Mendoza y San Juan, al igual que las ciudades cabeceras departamentales y distritales, se ubican a lo largo de los cauces de los ríos y arroyos que descienden de los Andes, donde fueron establecidas por los españoles como única alternativa para garantizar el asentamiento urbano a largo plazo.

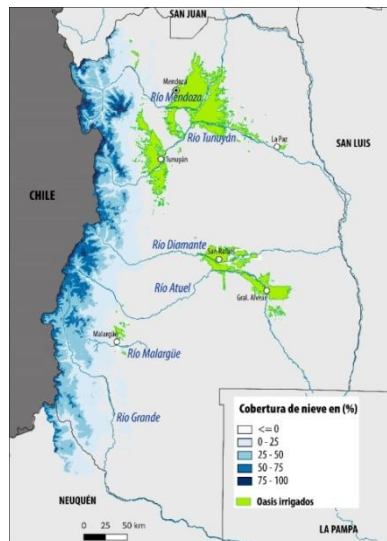


Figura 3. Distribución de la cobertura de nieve en la Provincia de Mendoza estimada como el porcentaje de días al año en que la superficie del territorio provincial permaneció cubierta de nieve en la estación invernal (abril a octubre) durante el periodo 2000-2024. En verde se muestran los oasis irrigados que se alimentan casi en su totalidad del agua proveniente de la Cordillera de los Andes.

Con una precipitación total anual inferior a los 250 mm en el piedemonte andino y las zonas llanas adyacentes, la Cordillera de los Andes es la fuente principal de agua para más de tres millones de personas que habitan los oasis irrigados del Gran Oeste Argentino. En el sector andino de las provincias de San Juan y Mendoza, la Cordillera de los Andes actúa como barrera que capta la humedad transportada por las masas de aire del Pacífico, principalmente en invierno. En forma de nieve, las precipitaciones cubren las altas montañas ubicadas en una franja muy estrecha de los territorios provinciales.

La nieve acumulada en la alta cordillera durante el invierno, que comienza a derretirse con el aumento de las temperaturas en primavera y verano, es la fuente principal del caudal de los ríos en la región. En el periodo común de 1951 a 2022 (72 años) con mediciones entre la nieve y los caudales regionales, las variaciones interanuales de la nieve en invierno (de mayo a octubre) explican alrededor del 85 % del caudal anual de los ríos cordilleranos. Como se muestra en la Figura 4, los inviernos nevadores se corresponden con abundantes caudales en los ríos y viceversa.

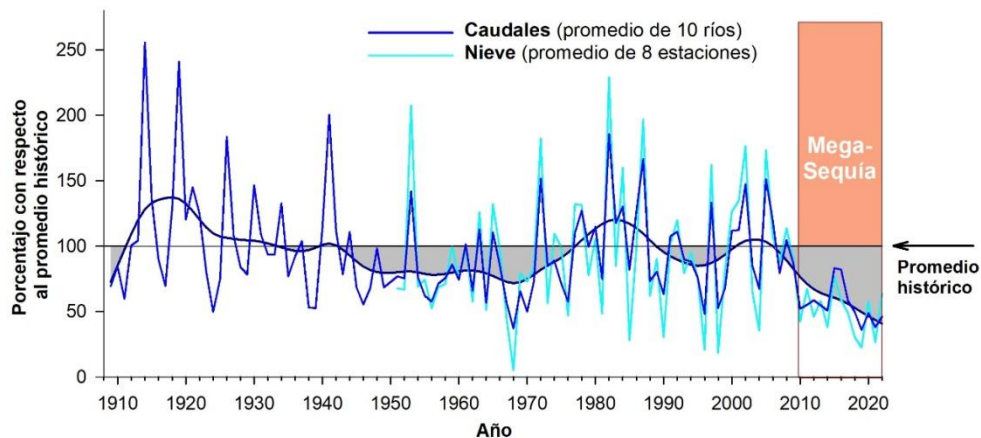


Figura 4. Comparación de los promedios regionales de acumulación de nieve (línea celeste) y caudal anual (línea azul) en el sector de los Andes de Mendoza, San Juan y regiones vecinas en Chile (entre 30° y 37°S). Desde 2010, tanto la nieve como los caudales se mantuvieron persistentemente por debajo al promedio histórico. La gran similitud entre las series de nieve y caudales es notable.

A pesar de la estrecha relación entre la nieve acumulada durante el invierno en la alta Cordillera de los Andes y los caudales de los ríos que se originan en ella, la variabilidad interanual de la nieve es mayor que la de los caudales. Si bien debemos considerar el efecto atenuador de los gigantescos depósitos de sedimentos en la cordillera, que actúan

como una esponja regulando la escorrentía andina, hay otro componente del ciclo hidrológico que juega un papel fundamental modulando la variabilidad interanual de los caudales: los cuerpos de hielo de la alta cordillera. Estos incluyen los glaciares en sus diversas expresiones y el permafrost andino. En años de abundantes precipitaciones, la nieve contribuye al aumento de la masa de hielo en la cordillera y, por lo tanto, la escorrentía observada es menor que la que debería esperarse del total de nieve acumulada. Por ejemplo, en el año 1982, los caudales fueron un 186 % superiores a la media histórica, pero la nieve acumulada fue aún mayor, alcanzando una media del 229% (Figura 4). La precipitación se retiene en los cuerpos de hielo y en los grandes depósitos sedimentarios. Por el contrario, en inviernos secos como el del año 1968, en el que la precipitación nival solo alcanzó el 5% en relación al promedio histórico, los caudales andinos, si bien fueron bajos, redondearon un promedio del 37%, un porcentaje muy superior al de la nieve caída. En otras palabras, los cuerpos de hielo incrementan su masa durante años con grandes nevadas para contribuir, a través de la ablación del hielo, a la escorrentía andina en años de escasas precipitaciones nivas. Estudios isotópicos recientes y modelado hidrológico indican que los cuerpos de hielo pueden llegar a contribuir hasta un 30%, excepcionalmente hasta un 50%, de la escorrentía de algunas cuencas andinas en años de muy bajas precipitaciones nivas. Los cuerpos de hielo y los sedimentos conforman un régimen natural de regulación de los caudales andinos que difícilmente podría lograrse con obras de ingeniería que requirieran inversiones millonarias y tuvieran un marcado impacto ambiental.

La sostenibilidad de aporte hídrico cordillerano frente al Cambio Climático

El aumento de la temperatura planetaria debido al incremento de los gases de tipo invernadero se intensifica con la elevación. Los escasos registros de temperatura en los Andes indican que este es el caso. Como indicamos, precisamente en la alta cordillera de los Andes Centrales de Argentina y Chile ocurren los procesos físicos básicos que dan origen al agua que conforma la escorrentía andina: la intercepción de masas de aire cargadas de humedad provenientes del Pacífico, la formación de una extensa cobertura nival durante el invierno, la interacción con el ciclo anual de la temperatura para concentrar el derretimiento de la nieve y, por ende, los mayores caudales, en los meses de primavera y verano, y el juego de las interacciones entre la nieve, los cuerpos de hielo y los sedimentos andinos para regular eficientemente la escorrentía. El cambio climático antropogénico ha llegado para alterar el funcionamiento de los componentes

de este maravilloso balance hidrológico natural que ha sustentado los asentamientos humanos en los oasis irrigados del oeste argentino durante los últimos siglos.

Desde el invierno de 2010, la precipitación nival en los Andes Centrales se ha mantenido por debajo del promedio histórico de los últimos 72 años (Figura 4). Durante esta sequía extraordinaria, sin precedentes en el registro histórico iniciado en 1951, las precipitaciones nivas alcanzaron valores mínimos extremos del 22,5% y del 26,5% en los inviernos de 2019 y 2021, respectivamente. Registros de nevadas superiores al 70% del promedio histórico solo se registraron en los inviernos de 2015 y 2023, que coincidieron con los intensos eventos de El Niño 2015-16 y 2023-24 en el Pacífico tropical. Es bien conocida la relación entre los eventos El Niño en el Pacífico y las abundantes precipitaciones en los Andes centrales de Chile y Argentina. Sin embargo, mientras los eventos El Niño de magnitud similar a los registrados en 2015-16 y 2023-24 se asociaban a nevadas extraordinarias con porcentajes comparativos cercanos o superiores al 200% en relación al promedio histórico, no alcanzaron el 80% durante este extenso periodo de sequías severas (Figura 4). Esta sequía extraordinaria, que ha afectado seriamente a las economías de regadío en ambas vertientes de los Andes, ha sido elevada por su larga extensión a la categoría de Megasequía. No hay ningún evento climático similar en magnitud y duración en el registro histórico de más de 70 años de nieve en la cordillera. Si bien puede alegarse que los forzantes naturales de la variabilidad climática han contribuido a la ocurrencia de este evento de más de diez años de extensión, el incremento antropogénico de los gases de efecto invernadero en la atmósfera pareciera haber jugado un papel importante en la concreción de este evento climático extremo.



Figura 5. Retracción del Glaciar del Humo, cuenca superior del Río Atuel, Mendoza. Comparación entre una fotografía de 1914 tomada por Walter von Fisher (izquierda) y la imagen reciente generada (marzo de 2024) a partir de Google Earth (derecha).

La reducción generalizada de las precipitaciones y el aumento sostenido de las temperaturas, particularmente durante las últimas décadas, han intensificado la pérdida de masa de los cuerpos de hielo y acelerado la retracción de los glaciares en los Andes Centrales de Argentina y Chile (Figura 5). El volumen de hielo perdido entre 2000 y 2018 en las cuencas hídricas de los Andes Centrales es equivalente a más del 100% del caudal total anual en las cuencas de los ríos Mendoza y Tunuyan. Esta impresionante reducción en los cuerpos de hielo de la alta Cordillera afectará negativamente a la capacidad regulatoria de los caudales andinos frente a eventos de sequías extremas más frecuentes, como prevén los escenarios climáticos para los Andes Centrales a lo largo del presente siglo.

Los cambios en la escurrentía y en el ciclo hidrológico andino inducidos por el Cambio Climático agregan mayor complejidad al enorme desafío que representa el manejo de un recurso escaso y altamente variable como es el agua en las tierras secas del Gran Oeste Argentino. Para reducir estas incertidumbres, la comunidad científica local, los gobiernos y las instituciones provinciales a cargo del manejo del agua están trabajando en forma conjunta para lograr una evaluación sistemática y continua del recurso hídrico. Estos grupos han acordado aumentar la red de estaciones meteorológicas de altura, manejar en tiempo real y en forma coordinada los datos hidrometeorológicos, y fortalecer los equipos técnicos provinciales.

El trabajo conjunto de científicos y tomadores de decisiones está también orientado a consolidar políticas públicas, planes y programas destinados a aumentar la eficiencia de los sistemas de regadíos y adaptar los cultivos tradicionales a las futuras condiciones climáticas. Los especialistas coinciden en la necesidad de formar recursos humanos capacitados para enfrentar los nuevos desafíos que plantean los cambios en la oferta hídrica de las regiones áridas, en la implementación de programas educacionales revalorando el recurso agua, y en la facilitación de procesos destinados al uso de energías limpias. Estas iniciativas deberían consolidarse y considerarse prioritarias para un desarrollo sustentable y sostenido de las actividades socio-económicas de los oasis irrigados del oeste argentino.

5. Conclusiones

Por diversos motivos, cabe esperar que las poblaciones de Argentina en el futuro se vean fuertemente afectadas por la variación en la disponibilidad espacio-temporal del agua. En los grandes centros urbanos, la probabilidad de inundaciones severas estará aumentada. En regiones con baja pluviosidad, como el Gran Oeste Argentino, la escasez de agua puede verse muy aumentada. El litoral marítimo de la provincia de Buenos Aires y la Patagonia verá importantes cambios en el comportamiento del Mar Argentino, que está también siendo afectado por la contaminación. Por otra parte, se torna urgente prestar atención a las obras de ingeniería hidráulica, que prestan un invaluable servicio y necesitan por ello mismo atención y mantenimiento adecuados que garanticen la seguridad de las poblaciones cercanas. Además, es imperativo minimizar el impacto ambiental en las cuencas hidrográficas para mantener los valiosos servicios ecosistémicos asociados al suministro de agua a la sociedad y a la conservación del medioambiente.

Lecturas sugeridas

Bacchiega, J.D., Lopardo, M.C. y Lopardo, R.A. (2015). *Extreme flood events due to intense rainfall in urban zones. Learning of recent disasters in Argentina*, Proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, The Netherlands.

Cara, L., Masiokas, M.H., Viale, M., Villalba, R. (2016). *Análisis de la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS*. Meteorológica, 41(1), 21-36.

Ferri, L., Dussailant, L., Zalazar, I., Masiokas, M.H., Ruiz, L., Pitte, P., Gargantini, H., Castro, M., Berthier, Et., Villalba, R. (2020). *Ice Mass Loss in the Central Andes of Argentina Between 2000 and 2018 Derived From a New Glacier Inventory and Satellite Stereo-Imagery*. Front. Earth Sci. 8:530997.doi: 10.3389/feart.2020.530997

Franco, B.C., et al., 2020, *Climate change impacts on fisheries in the southwest South Atlantic Ocean: A review*, Climatic Change, **162**, 2359–2377.

Martinetto P. et al., 2020, *Linking the scientific knowledge on marine frontal systems with ecosystem services*, Ambio, **49**, 541–556.

Risaro, D.B. et al., 2022, *Interannual variability and trends of sea surface temperature around southern South America*, Frontiers in Marine Science, 9:829144, 1-20.

Gil, M.N., E. Giarratano, V. Barros, A. Bortolus, J.O. Codignotto, R. Delfino Schenke, M.E. Góngora, G. Lovrich, A.J. Monti, M. Pascual, A.L. Rivas, A. Tagliorette (2019).

Southern Argentina: The Patagonian Continental Shelf. In: *World Seas: An Environmental Evaluation, Vol I: Europe, The Americas and West Africa*, C Sheppard (Ed), 2nd Edition, Elsevier Sci. Publishers, London (UK), Ch.34, 783-811 (914 pp). ISBN 978-0-12-805068-2

IPCC AR6 (2022): *IPCC Sixth Assessment Report* (especialmente el Capítulo 4, *Water*).

Marcovecchio, J.E. (2011). *Land sources of pollutants impacting coastal marine ecosystems from Argentina*. En: *Interacciones en el Planeta Tierra*, R. Gio-Argaez & M.T.L. Rosales-Hoz (eds), ICMYL – UNAM Ed., México D.F. (México), pp. 73-81 (248 pp). (ISBN: 978-607-02-1997-9).

Marcovecchio, J.E., S.G. De Marco, M.A. Gavio, M. Narvarte, S. Fiori, M.S. Gerpe, D.H. Rodríguez, M.C. López Abatte, N.S. La Colla, A.L. Oliva, S. Zalba, M.C. Bazterrica, V.A. Guinder, C.V. Spetter, M.D. Fernández Severini, A.H. Arias, S.E. Botté (2019). *Environmental evaluation of the Northern Argentine Sea (South-Western Atlantic Ocean, 35°- 42°S)*. En: *World Seas: An Environmental Evaluation, Vol I: Europe, The Americas and West Africa*, C Sheppard (Ed), 2nd Edition, Elsevier Sci. Publishers, London (UK), Ch.33, 759-781 (914 pp). ISBN 978-0-12-805068-2

Masiokas, M. H., R. Villalba, B. H. Luckman, E. Montaña, E. Betman, D. Christie, C. Le Quesne, S. Mauget (2013): *Recent and Historic Andean Snowpack and Streamflow Variations and Vulnerability to Water Shortages*. En *Central-Western Argentina. Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*. Elsevier Inc., Academic Press, 213–227 pp.

Villalba, R., Boninsegna, J.A., Masiokas, M.H., Cara, L., Salomon, M., Pozzoli, P. (2016). *Cambios Climáticos y Recursos Hídricos: El caso de las tierras secas del oeste argentino*. *Ciencia Hoy*, **45**: 49-55.