

De desecho a recurso: el uso de aguas residuales tratadas en la producción de forraje

María Victoria Cremona¹, Martha Cecilia Riat², Virginia Velasco³, Carlos Catenazzo⁴

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) “Dr. Grenville Morris” Bariloche, Modesta Victoria N° 4450, San Carlos de Bariloche, Río Negro.

²Universidad Nacional de Río Negro, Instituto de Investigaciones en Agroecología, Recursos Naturales y Desarrollo Rural (IRNAD), Anasagasti 1463, San Carlos de Bariloche, Río Negro.

³Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) “Dr. Grenville Morris” Bariloche, Agencia de Extensión Rural (AER) Ingeniero Jacobacci, Gobernador Soria N° 43, Ingeniero Jacobacci, Río Negro.

⁴Universidad Nacional de Río Negro, Anasagasti 1463, San Carlos de Bariloche, Río Negro.

“Estos resultados fueron parcialmente publicados en el ^{xxvii} Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, 2022”.

cremona.mv@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

Los tratamientos de aguas residuales urbanas generan como subproducto agua concentrada en el espacio y el tiempo en la salida de las plantas de tratamiento que tienen en suspensión una gran carga de nutrientes. Si esas aguas se vierten a cuerpos receptores hídricos constituyen un problema potencial de contaminación con carga orgánica por los riesgos de eutrofización que eso implica, con impactos ambientales que pueden revestir diferente gravedad de acuerdo a las características de ese cuerpo receptor (Pedrero *et al.*, 2010). En cambio, el uso de esas aguas residuales tratadas para el riego en la producción de cultivos representa una muy interesante oportunidad para aprovechar tanto el agua como los nutrientes, a la vez que se cierra el tratamiento con un mínimo impacto en el ambiente (WWAP, 2017; Quadir *et al.*, 2010).

La reutilización tiene como objetivo cerrar el ciclo hidrológico a escala local reciclando principalmente nitrógeno y fósforo presentes en las ART, convirtiéndolas así en un recurso. Su utilización en lugar del agua potable en riego agrícola y forestal es una alternativa que resulta de especial interés en áreas donde la escasez de agua afecta las actividades humanas (Faleschini, 2016). Sin embargo, es también un riesgo ambiental que debe ser monitoreado. En la bibliografía se reportan efectos negativos relacionados con el incremento de la salinidad y sodicidad que pueden provocar toxicidad específica de algunos iones como el sodio y problemas de infiltración por pérdida de estructura (Pedrero *et al.*, 2010), sobrecarga de nutrientes, que puede afectar a los cultivos, acumularse en el suelo o lixiviarse y afectar fuentes de agua, y acumulación de metales pesados u otros contaminantes orgánicos,

aunque estos últimos tienden a precipitar en los tratamientos previos al reúso (Hamilton *et al.*, 2007).

Se estima que a nivel mundial el agua residual tratada se reutiliza en el riego de 4,5 millones de hectáreas, lo que representa un 1,5 % del área de riego total (Bixio *et al.*, 2006). En Argentina, la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuenecas de los ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC) trabaja desde hace más de una década en la propuesta llamada Vuelco cero, reglamentando la reducción del vuelco de efluentes tratados a los cursos de agua como cuerpos receptores. Río Negro se suma, desde el año 2012, normalizando y regulando la RART (DPA, 2014), definiendo que todas las plantas de tratamiento que se construyan o se proyecten desde ese año deben incorporar programas de reutilización.

La zona centro de la provincia de Río Negro integra los dos tercios de la

superficie en la Argentina que presenta balances hídricos negativos la mayor parte del año, esto señala una importante limitación para todo tipo de actividades productivas y, en muchos casos, dificulta el abastecimiento de agua para consumo humano. La localidad de Ingeniero Jacobacci se localiza en la región centro-sur de la provincia de Río Negro y se caracteriza por situarse en un ecosistema xérico, con un estado de desertificación medio a grave, cuya principal actividad económica es la ganadería ovina (Godagnone y Bran, 2009). En esta ciudad funciona una planta depuradora de aguas cloacales mediante lagunas facultativas que genera un caudal de agua residual de aproximadamente 200 m³/día, proveniente de un barrio que eran volcadas a un mallín en el faldeo norte del predio, un área ambientalmente sensible, considerando la cercanía de la zona urbana.

Para evitar el vuelco al mallín y aprovechar el recurso en esta región en donde la producción bajo riego es de otro modo muy dificultosa, se están llevando adelante ensayos de reutilización en la producción de forraje. En mayo de 2015, se firmó un convenio entre el Departamento Provincial de Aguas, la Universidad Nacional de Río Negro, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, la Municipalidad de Ingeniero Jacobacci y la Cooperativa de Agua y Servicios Públicos de Jacobacci, para instalar en febrero de 2016 un ensayo de reutilización de aguas residuales tratadas para la producción de forraje y material leñoso. Su objetivo es evaluar el impacto de la reutilización de efluentes tratados en las propiedades del suelo y en la productividad vegetal mediante el riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se instaló en 2016 y se realizó un diseño experimental en parcelas divididas, donde el tipo de agua utilizada para riego es el factor principal, mientras que dentro de las parcelas principales se aleatorizaron los tratamientos del tipo de vegetación (alfalfa y campo natural), en parcelas por triplicado de 2 x 3 m. La alfalfa se sembró a fines de febrero y se comenzó a regar inmediatamente. El tratamiento de campo natural consistió en la remoción de la vegetación natural para la sistematización del terreno, permitiendo la proliferación de la vegetación espontánea.

El riego se realiza por melgas y el agua es conducida por tuberías hasta su cabecera. Se riega diariamente, de sep-

Tabla 1. Datos analíticos del agua residual tratada y de perforación utilizada en el ensayo.* CFI, 1991. Perforación J11 (41° 19' S, 69° 31' O) (**) Lab UNC 5/15 y DPA.

	Agua residual tratada (**)	Agua de perforación(*)
pH	7,6	8,2
Conductividad (mS/s)	1,6	1,2
DQO (mgO ₂ /ml)	358	-
Fósforo total (mgP/l)	7,1	-
Nitrógeno total (mgN/L)	25	-
Nitratos mg/L	-	7
RAS	5,5	9

Tabla 2. Características generales de suelo del ensayo.

Prof. en cm	0-20	20-40	40-60
pH agua (1:2,5)	8,33		
Conductividad eléctrica (1:2,5) (dS/m)	0,1		
% Materia orgánica	0,5		
% Nitrógeno total	0,04		
Rel C/N	7		
Fósforo disponible (Olsen)	2,19		
Capacidad de Campo	9,1	9,6	9,6
Punto de Marchitez Permanente	5,6	5,9	6,1

tiembre a principios de junio, con una lámina de aproximadamente 10 mm, con el objetivo de disponer la mayor cantidad de agua tratada posible, con un sistema automatizado y bajo la supervisión del personal de la planta.

En cada temporada de crecimiento se realizaron tres y cuatro cortes de la vegetación en todas las parcelas, en la zona central de estas, en un marco de 0,2 m², secándose el material en estufa a 60 °C. Se calculó el rendimiento total como la suma de los cortes y se expresaron los resultados en kg MS/ha. En cada cosecha se hizo un corte de limpieza de toda la parcela, dejando aproximadamente 10 cm de altura de vegetación remanente para favorecer el rebrote.

Al inicio del ensayo y al final de cada temporada de crecimiento (mayo/junio) se realizaron muestreos de suelo. Se tomaron muestras individuales por parcela hasta los 80 cm de profundidad a intervalos de 20 cm. En laboratorio se secaron y tamizaron por malla de 2 mm, determinándose sobre cada una de ellas el pH en agua (relación suelo agua 1:2,5) y la conductividad eléctrica de la suspensión. En los muestreos de la temporada 2018 se evaluaron también nitrógeno inorgánico, amonio (NH₄) y nitrato (NO₃) con destilación de Bremner y fósforo disponible por el método Olsen

(Sparks *et al.*, 1996). El ensayo prevé el monitoreo de otro conjunto de variables edáficas que no son presentadas en este trabajo.

La caracterización del agua residual tratada y la de perforación se detalla en la tabla 1 y los suelos en la tabla 2.

Para el análisis estadístico se realizaron análisis de variancia de los datos, con el diseño en parcelas divididas y seleccionando la comparación de interés especificada en cada caso. Se utilizó el programa INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

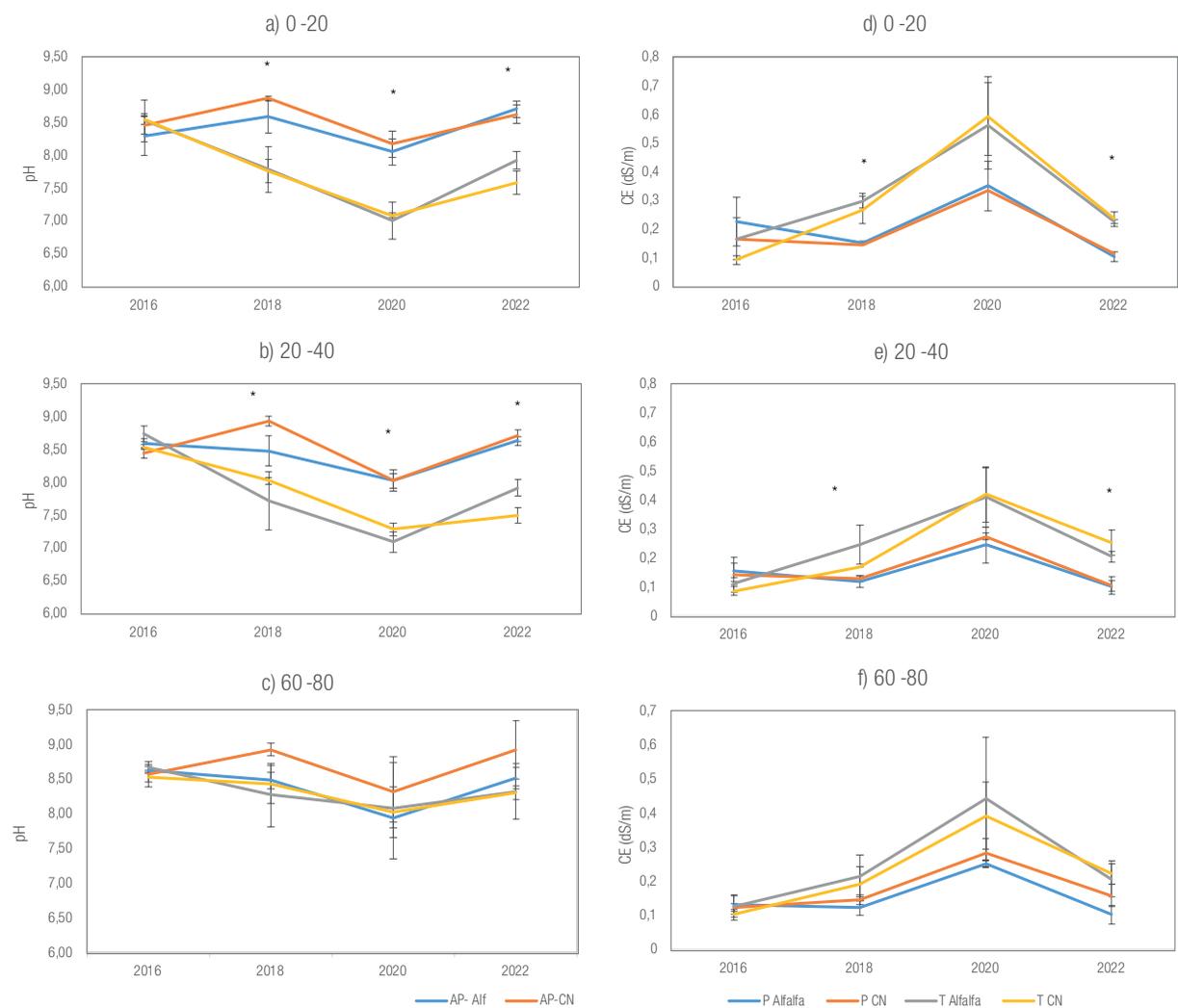
Desarrollo de la vegetación

El riego con ART, además de satisfacer los requerimientos de agua de un cultivo, provee de una buena cantidad de nutrientes que se manifiestan en los rendimientos. En este caso, la producción de MS/ha de la vegetación mostró resultados variables entre las temporadas, en función de las condiciones climáticas (temperatura y heladas) reinantes en cada una de ellas (tabla 3), pero en general hay diferencias entre tratamientos, muy notorias a favor de los regados con ART. En las primeras temporadas las diferencias entre la alfalfa regada con

Tabla 3. Rendimiento de las parcelas forrajeras al final de las temporadas de muestreo. *el último corte de 2020 es estimado, ya que no pudo realizarse debido al ASPO. Las letras indican diferencias significativas ($p > 0,05$).

Agua	Vegetación	2018		2020 *		2022	
Pozo	Alfalfa	46244 ±	1624 a	22012 ±	3616 a	29332 ±	6352 a
	Campo Natural	16766 ±	5274 b	12258 ±	1181 b	11246 ±	4398 b
ART	Alfalfa	50579 ±	7936 a	26387 ±	883 a	35062 ±	10565 b
	Campo Natural	42216 ±	7530 a	14487 ±	525 b	26781 ±	2460 ab

Figura 1. Evolución de la reacción del suelo desde la instalación del ensayo (2016) y cada dos años de riego, para los diferentes tipos de vegetación (alfalfa y campo natural) y tipos de agua utilizados (P de perforación y T agua residual tratada). Los asteriscos indican diferencias significativas entre tipos de agua ($p < 0,05$).



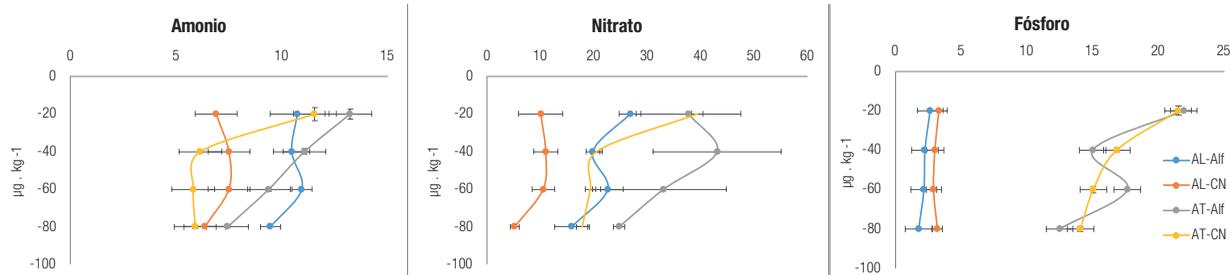
ambos tipos de agua no son significativas, pero el aporte de nutrientes del ART permite lograr mejores rendimientos en la temporada 2022, en la medida que algunos nutrientes en los tratamientos regados con agua de pozo pueden empezar a tornarse limitantes. En el campo natural, la diferencia a favor del ART es siempre significativa.

Salinidad y alcalinidad

El riego en general y en función del manejo que se haga del agua implica la adición de sales al suelo, que pueden acumularse y generar efectos adversos en las características físicas del suelo y el desarrollo de las plantas. Esto puede ser aún más significativo con aguas de reúso y es potencialmente uno de los riesgos

ambientales más preocupantes que esta práctica puede generar. Para monitorear este proceso, se muestra en la figura 1 la evolución en el tiempo del pH y conductividad eléctrica, desde el muestreo inicial en febrero de 2016 y luego de las diferentes temporadas de riego a lo largo de 6 años. Los valores iniciales de pH son moderadamente alcalinos, típicos de los suelos

Figura 2. Amonio, nitrato y fósforo disponible en el perfil del suelo en los tratamientos regados con agua tratados vs. agua de perforación.



áridos sobre los cuales se instaló el ensayo. Sin embargo, ya desde la primera fecha de muestreo reportada, en 2018 se observa un descenso significativo de este de por lo menos medio punto en los tratamientos regados con agua tratada. Esta tendencia se acentúa y alcanza hasta un punto de descenso en los años siguientes en los primeros 20 cm de profundidad (figura 1 a). En el horizonte siguiente (20-40 cm) (figura 1 b) también se verifica la tendencia, con una magnitud algo menor, pero con diferencias estadísticamente significativas a partir de los dos años de riego.

La respuesta del pH al riego con ART es muy variable según el suelo de que se parte (Minz *et al.*, 2011). El agregado de materia orgánica y formas orgánicas e inorgánicas de nitrógeno con el agua y su degradación en el suelo pueden desencadenar procesos que generen un aumento de la acidez (Paul, 2016) que se refleja rápidamente en suelos que tienen muy poca capacidad de amortiguación, como es el caso de los suelos arenosos del presente estudio. El aumento de actividad biológica también puede contribuir a este fenómeno, por el incremento del CO₂ generado en la respiración microbiana. Ambos procesos son beneficiosos para suelos pobres como los originales del ensayo, mejorando su fertilidad potencial no solo por el aumento en la dotación de nutrientes, producto del aporte de materia orgánica, sino también por la mejora en la disponibilidad de algunos elementos como el fósforo que pueden verse restringidos en condiciones de alcalinidad. En profundidad no se verifican estos procesos, por lo que no

se observan diferencias significativas entre tratamientos.

La conductividad eléctrica, en cambio, se incrementó significativamente en los tratamientos con agua tratada respecto de los regados con agua de perforación en magnitudes que varían entre 0,1 y 0,2 dS/m, en algunas fechas de muestreo y en los horizontes hasta 40 cm (figura 1 d y e). Por un lado, en el agua tratada, este aumento de la CE se podría deber a una combinación de factores: en principio su CE es levemente más alta que el agua de perforación (tabla 1), pero por otro lado junto con el agua también se incorporan con la materia orgánica y formas inorgánicas de nitrógeno que podrían contribuir a este incremento (Lemeillet *et al.*, 2017). Es un parámetro que también resulta mucho más variable, y los desvíos en las mediciones de una misma fecha son mayores, pero también entre fechas, ya que en el último muestreo (2020) se observan leves descensos respecto del anterior.

Es importante destacar que la magnitud de estos incrementos no sugiere riesgos en el mediano plazo. A pesar de ello, para planteos de largo plazo en zonas áridas resultaría conveniente realizar balances de sales que permitan estimar la vida útil de los proyectos de reutilización.

Nutrientes disponibles

Los nutrientes aportados por el ART pueden ser extraídos por la biomasa producida en los cultivos y enriquecer la dotación del suelo, pero si son por encima de la capacidad de retenerlos

del suelo se convierten en un riesgo potencial de lixiviación y contaminación de fuentes de agua subterráneas (Bar-Tal, 2011). En este estudio, en las muestras de suelo realizadas a final de cada temporada de crecimiento se determinaron los nutrientes disponibles en el suelo hasta los 80 cm y los resultados se muestran en la figura 2.

El ART aporta N fundamentalmente en forma de amonio y formas orgánicas solubles que en condiciones favorables a la nitrificación determinan el enriquecimiento del suelo en forma de nitrato (Bar-Tal, 2011), lo que depende de las características del suelo y del ambiente. Estas condiciones se evidenciaron en este ensayo, en donde las concentraciones de nitrato alcanzaron valores superiores a la de amonio en todo el perfil. Y si bien las diferencias no son tan evidentes entre tratamientos, la alfalfa, una especie fijadora de N, parece menos eficaz que otras en la remoción del excedente, ya que tiende a presentar los valores más altos de ambas formas en buena parte del perfil. En el P en cambio se observa claramente una mayor acumulación de este nutriente en hasta los 80 cm en los tratamientos regados con ART.

La acumulación de nutrientes es aún en todos los casos mayor en superficie que en profundidad, y aunque los valores máximos observados aún no representan riesgos ambientales, se evidenció una clara tendencia a la carga de nutrientes del suelo en los tratamientos con riego con ART, lo que obliga a realizar en todos los casos monitoreos ambientales rigurosos que prevengan potenciales riesgos de contaminación de acuíferos.

CONCLUSIONES

EL riego con ART es una práctica que puede aportar a una gestión más eficiente del ciclo hidrológico, utilizando un recurso disponible y minimizando los riesgos ambientales de contaminación de cuerpos receptores.

Del análisis comparativo entre los tratamientos con agua tratada y agua de perforación, se observan algunos cambios positivos, especialmente en suelos naturalmente pobres en materia orgánica y nutrientes, pero también algunos no deseados que son necesarios monitorear rigurosamente para evitar el deterioro de la calidad del suelo o excesos de nutrientes que puedan generar movimientos no deseados a las napas freáticas.

AGRADECIMIENTOS

A Antonio Curruman, por su trabajo en el mantenimiento y cuidado del ensayo. Al Departamento Provincial de Aguas, en especial Santiago Magnin, el municipio y la Cooperativa de Agua de Ingeniero Jacobacci y el ENTE de la Región Sur por el apoyo a este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

BAR-TAL, A. (2011). Nitrogen in treated wastewater-irrigation. En: LEVY, G; FINE, P AND BAR-TAL, A. (eds.). Treated Wastewater in agriculture: use and

impacts on the soil, environment and crops. Wiley Blackwell, 446 p.

BIXIO, D.; THOEYE, C.; DE KONING, J.; JOKSIMOVIC, D.; SAVIC, D.; WINTGENS, T.; MELIN, T. (2006). Wastewater reuse in Europe. *Desalination* 187. 89-101 pp.

DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. (2017). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. (Disponible en: <http://www.infostat.com.ar> verificado: 03 de octubre de 2022).

FALESCHINI, M. (2016). Estrategias, dificultades y beneficios en la aplicación del reúso del agua tratada en tres municipios de la Patagonia. IFRH.

GODAGNONE, R.E.; BRAN, D. (2009). Inventario de los Recursos Naturales de la Provincia de Río Negro. Actualización. Ediciones INTA.

HAMILTON, A.; STAGNITTI, F.; XIONG, X.; KREIDL, S.; BENKE, K.; MAHER, P. (2007). Wastewater irrigation: the state of play. *Vadose zone journal*, vol.6, n.º 4, 823-840 pp.

LEMEILLET, F.; SAINATO, C.; MAL-LEVILLE, H.; CARBÓ, L.; HERRERO, A. (2017). Electrical conductivity of a soil treated with effluent from Livestock. *Geoacta (Argentina) Volume 41, Issue 2*, 57-73 pp.

MINZ, D.; KARYO, R.; GERSTL, Z. (2011). Effect of municipal treated wastewater irrigation on soil microbiology. En: LEVY, G.; FINE, P.; BAR-TAL, A. (eds.). Treated

Wastewater in agriculture. Wiley-Blackwell. 445 p.

PAUL, E.A. (2016). The nature and dynamics of soil organic matter: plant inputs, microbial transformations and organic matter stabilization. *Soil Biology and Biochemistry* 98:109-126 pp.

PEDRERO, F.; KALAVROUZIOS, J.; ALARCÓN, J.J.; KOUKOULAKIS, P.; ASANO, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management* 97 (2010) 1233-1241 pp.

QADIR, M.; WICHELNS, D.; RASCHID-SALLY, L.; MCCORNICK, P.G.; DRECHSEL, P.; BAHRI, A.; MINHAS, P.S. (2010). The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural Water Management* 97 561-568 pp.

SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSON, C.T.; SUMNER, M.E. (1996). *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA Book.

WWAP (PROGRAMA MUNDIAL DE EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LAS NACIONES UNIDAS). (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO.