REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE BAJA CONDUCTIVIDAD Y NO ARSENICALES PARA ACTIVIDADES PRODUCTIVAS Y RECREATIVAS EN ZONAS DE ESTRÉS HÍDRICO

Cecilia Theulé[1]
[1] ITBA – Solidagro
Email: ctheule@solidagro.org.ar

RESUMEN

En un planeta con sólo el 0.9% del agua dulce disponible, el manejo del recurso está en el foco preferencial de la agenda de UN, conforma el punto 6 de los ODS, y se encuentra integrado a las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático.

En ese contexto, esta investigación presenta un estudio de reutilización de aguas residuales de baja conductividad y no arsenicales para actividades productivas y recreativas en zonas de estrés hídrico. La zona del Chaco elegida (Concepción del Bermejo) combina alto estrés hídrico, con aguas subterráneas arsenicales (> 0.05ml/l) y salinas (>4000 μS/cm). El agua dulce se obtiene por un tratamiento potabilizador incipiente (de RO), de alto costo y complejidad técnica.

El trabajo estudia 2 alternativas de tratamiento (llamadas A y B) de aguas residuales domésticas a través de lagunas y humedales, precedidas por una cámara séptica, a fin de que –a través de un sistema de tratamiento de bajo impacto y menor costo que los reactores tradicionales- el agua pueda reusarse con fines productivos y/o recreativos. Los 7 reúsos posibles de los efluentes tratados se clasificaron de acuerdo con parámetros de WHO/FAO/EPA. Los resultados muestran la necesidad de considerar alternativas de bajo impacto ambiental y costo accesible para el reúso del recurso agua, especialmente en zonas de agua con alta conductividad y As.

Como referencia principal en los aspectos referidos a humedales de tratamiento, se tomará la segunda edición del *Treatment Wetlands* de Kadlec y Wallace (Kadlec & Wallace, 2009), complementada con la colección de trabajos, libros y *papers* de Vymazal, todos denominados *Constructed Wetlands for wastewater treatment* (Vymazal, 2008) de debido a que abarcan extensa y profundamente la casi totalidad de variables a considerar en el tratamiento de aguas residuales a través de humedales.

1- GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DEL EFLUENTE

Localización y población

La localización del estudio se encuentra en el Municipio de Concepción del Bermejo, Departamento de Almirante Brown, provincia de Chaco (figura 5), 26º35'50'' de latitud y a 60º56'41'' de longitud, a 110 msnm (metros sobre nivel del mar) de altitud.

En la localidad de referencia, se experimentó un crecimiento inter-censal de aproximadamente 70%, El departamento tiene una densidad habitacional menor a 20 hab/km^2. (SISAG, 2009)

El municipio es de segunda categoría y está catalogado como uno de los 200 municipios más vulnerables de la Argentina (Solidagro, 2015). Sin embargo, a partir del año 2009, se comenzó un proceso de evolución importante, a través de la articulación público-privada de acciones de desarrollo. (Solidagro, 2015) (Senado de la Nación - Comisión de Asuntos administrativos y municipales, 2011)

Calidad del agua de pozo en Concepción del Bermejo

En el año 2010 se analizaron por primera vez, desde el Municipio 5 pozos diferentes de donde se extraía agua de bebida. Los resultados se recogen en la tabla 1.

Tabla 1 - Análisis de muestras de agua de pozo en Concepción del Bermejo - año 2010

	Unidad	Valor hallado en las muestras de pozos de Concepción del Bermejo 2010					Valor referencia consumo humano
		1	2	3	4	5	
Color	PtCo	Incoloro	Marrón claro	Incoloro	Incoloro	Incoloro	Incolora
Olor	-	Inodoro	Fétido	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Inodora
Turbiedad	NTU	No presenta	Leve	No presenta	No presenta	No presenta	Hasta 3 NTU
pH	-	7,9	8,2	8,1	7,8	7,1	6,5 - 8,9
Conductividad	µS/cm	7570	2260	1648	6830	2940	Acotada por STD
Alcalinidad total	mg/l CO_3Ca	800	150	50	820	640	Por confort
Arsénico	mg/l	3,02	0,10	0,10	0,10	0,10	0,01
Cloruros	mg/l	1900	677	400	1800	435	350 Por confort
Sodio	mg/l	1200	4440	260	1120	280	Por confort
Hierro	mg/l	0,40	0,25	0,12	0,7	0,25	2
Dureza total	mg/l CO_3Ca	390	25	185	375	345	400 Por confort
Flúor	mg/l	0,08	0,12	0,1	0,2	0,12	0,80
Nitritos	mg/l	0,04	0,05	0,05	0,06	3,00	0,10
STD	mg/l	5600	1500	1200	5500	2200	1500
Dureza	mg/l	675	60	150	675	560	400 Por confort
Calcio	mg/l	335	60	60	335	250	Sin límite
Magnesio	mg/l	80	10	22	80	75	Sin límite

En el año 2012 se volvieron a analizar otros 5 pozos diferentes. Los datos de laboratorio se resumen en la tabla 2 y los pozos siguen la numeración de modo correlativo con relación a la tabla 1. Para la identificación del origen de las muestras, se siguió un criterio similar al del año 2010, aunque se eligieron diferentes propiedades a fin de tener un espectro más amplio. (Solidagro, 2015)

Tabla 2- Análisis de muestras de agua de pozo en Concepción del Bermejo - año 2012

	Unidad	Valor hallado en las muestras de pozos de Concepción del Bermejo 2012					Valor referencia consumo humano
		6	7	8	9	10	

Color	PtCo	Perceptible	Perceptible	Perceptible	Perceptible	Perceptible	Incolora
Olor	-	No perceptible	No perceptible	No perceptible	No perceptible	No perceptible	Inodora
Turbiedad	NTU	Perceptible	Perceptible	Perceptible	Perceptible	Perceptible	Max3 NTU
pH	-	7,52	7,04	7,25	6,75	7,29	6,5-8,9
Conductividad	µS/cm	6130	2560	6000	3490	11960	Acotada por STD
Alcalinidad total	mg/l CO_3Ca	691	637	770	538	869	Por confort
Arsénico	mg/l	0,25	0,40	0,15	0,05	0,05	0,01
Cloruros	mg/l	454	170	510	284	1134	350 Por confort
Sodio	mg/l	1300	600	1500	850	2400	Sin límite
Hierro	mg/l	0	0,01	Ld	Ld	0,01	2
Sulfatos	mg/l	758	1121	1259	953	4389	400 Por confort
Flúor	mg/l	2,8	2,00	2,80	1,8	3,5	0,80
Nitritos	mg/l	0,01	0	0	0,79	0,01	0,10
STD	mg/l	4597,5	1920	4500	2618	8970	1500
Dureza	mg/l CO_3Ca	625	262	714	588	1488	400 Por confort
Calcio	mg/l	91	59	129	110	243	Sin límite
Magnesio	mg/l	130	49	142	116	303	Sin límite
Nitratos	mg/l	14	Ld	35	49	5	45
Potasio	mg/l	32	26	41	52	23	Sin límite
Bicarbonatos	mg/l	691	637	770	538	869	Sin límite
Carbonatos	mg/l	0	0	0	0	0	Sin límite

En ningún caso se tomaron datos de la profundidad de los pozos muestreados. Sí se identificó de modo genérico el nombre del propietario del pozo de donde procedía cada una de las muestras. Con relación al arsénico, se observa que 8 de las 10 muestras presentan niveles superiores a los aceptables, y las 2 restantes presentan niveles de 0,05mg/l, ubicándose en una zona de frontera.

De acuerdo con los datos proporcionados por personal de la Municipalidad, la primera agua que se encuentra al hacer pozos estaría entre los 6m y 8m de profundidad, mientras que el acuífero semi-confinado se encontraría entre los 23 m y los 27 m de profundidad. (Solidagro, 2015) **Plausiblemente se puede inferir que entre los 10 pozos muestreados y analizados en laboratorio se cuentan tanto lentejas de agua de recarga vertical, perforaciones al acuífero libre, al acuífero semi-confinado y al confinado, no pudiéndose correlacionar cada análisis con una profundidad determinada**.

A partir del estudio de los datos arrojados, con relación a los valores máximos permitidos, (tabla 3) y con el análisis general de parámetros de calidad del agua (tabla 4), se tomó la decisión de instalar una pequeña planta de ósmosis inversa (RO), costo que inicialmente superaba las posibilidades económicas de la localidad.

Tabla 3 – Comparativa de los 10 pozos: valores con relación a los máximos permitidos

Pozo	Arsénico	Sulfatos	Flúor	Cloruros	Nitritos y nitratos	TSS
1	Superior a 0,05mg/l	Normal	Normal	supera valor referencia	Normal	supera valor referencia
2	Superior a 0,05mg/l	Normal	Normal	supera valor referencia	Normal	Límite
3	Superior a 0,05mg/l	Normal	Normal	supera valor referencia	Normal	Normal
4	Normal	Normal	Normal	supera valor referencia	Normal	supera valor referencia
5	Normal	Normal	Normal	supera valor referencia	supera valor referencia	supera valor referencia
6	Superior a	supera valor	supera valor	supera valor	Normal	supera valor

	0,05mg/l	referencia	referencia	referencia		referencia
7	Superior a 0,05mg/l	supera valor referencia	supera valor referencia	Normal	Normal	supera valor referencia
8	Superior a 0,05mg/l	supera valor referencia	supera valor referencia	supera valor referencia	Normal	supera valor referencia
9	Tolerable 0,05mg/l	supera valor referencia	supera valor referencia	Normal	supera valor referencia	supera valor referencia
10	Tolerable 0,05mg/l	supera valor referencia	supera valor referencia	supera valor referencia	Normal	supera valor referencia
	80%	50%	50%	80%	20%	90%

Tabla 4 - Tabla comparativa de los 10 pozos: parámetros del perfil de calidad del agua

Pozo	Dureza	Salinidad	Turbiedad	Color & olor	pH
1	supera valor referencia	Salobre		Sin problemas	
2		Salada	Presenta	No tolerable	
3		Salobre		Sin problemas	
4	supera valor referencia	Salobre		Sin problemas	
5	supera valor referencia	Salobre		Sin problemas	
6	supera valor referencia	Salobre	Presenta	Con problemas	
7		Salobre	Presenta	Con problemas	
8	supera valor referencia	Salobre	Presenta	Con problemas	
9	supera valor referencia	Salobre	Presenta	Con problemas	Ligeramente ácida
10	supera valor referencia	Salobre	Presenta	Con problemas	

A partir del establecimiento de un sistema rudimentario de potabilización que abarcó el conjunto de las unidades habitacionales, se comenzó a contar con agua apta para consumo humano, de acuerdo con lo consignado en la tabla 5, a partir de muestras tomadas de canillas públicas.

Tabla 5 - Análisis de agua provisión en canillas públicas Concepción del Bermejo - Laboratorio de APA

Parámetro	**Unidad**	**Identificación puntos de muestreo**			**Valor ref. consumo humano**
		01	**02**	**03**	
Color Pt-Co	PtCo	5	5	5	Hasta 5
Olor	-	Sin olor	Sin olor	Sin olor	Inodora
Turbiedad	NTU	1	1	1	Max 3NTU
pH	-	7,6	7,6	7,6	6,5 - 8,5
Coliformes totales	NMP/100 ml	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< ó = 3
E. Choli	NMP/100 ml	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia en 100 ml
Pseudomonas aeruginosa	UFC/100 ml	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia en 100 ml
Bacterias mesófilas (APC24hs 37°C)	UFC/100 ml	< 500	< 500	< 500	Max.500 UFC/100 ml
Conductividad	µS/cm	1106	1106	1106	Acotada por STD
STD		664	664	664	Max 1500
Alcalinidad total	mg/l CO_3Ca	130	130	130	Por confort
Dureza total	mg/l CO_3Ca	68	68	68	Max 400 – Por confort
Hierro	mg/l	0	0	0	Mas 0.3
Flúor	mg/l	0.3	0.3	0.3	Límites: inf. 0.6 – sup. 0.8
Cloruros	mg/l	212	212	212	Max 350 - Por confort
Sulfatos	mg/l	82	82	82	Max 350 - Por confort
Nitritos	mg/l	0	0	0	Max 0,1
Nitratos	mg/l	2	2	2	Max 45
Arsénico	mg/l	0.005	0.005	0.005	Max 0,01
Calcio	mg/l	8	8	8	Sin límite
Magnesio	mg/l	12	12	12	Sin límite

Relación calidad / usos

La población de Concepción del Bermejo que se encuentra conectada a la red de distribución del permeado, utiliza el agua para todo destino, sin discriminación de calidades. Se puede con facilidad dar el caso de que el agua se utilice tanto para beber –en cuyo caso la calidad es la correcta-, como para el lavado de vehículos –para la que puede utilizarse exitosamente una calidad inferior-. Es obvio a este respecto que es necesario desarrollar campañas de concientización, control, etc.

Rendimiento del volumen de agua dulce obtenida

Lo que ocurre en la práctica de la gestión domiciliaria del agua de red es que el recurso, una vez utilizado y transformado en aguas grises / negras, no se aprovecha de modo sistemático y generalizado para usos que requieran de una calidad menor -desde el punto de vista microbiológico y de contenido de materia orgánica- ni se implementan tratamientos que permitan alcanzar esos usos, aprovechando el proceso previo de remoción de sales y sólidos de la RO.

2- PROPUESTA DE REUTILIZACIÓN DEL EFLUENTE DULCE Y NO ARSENICAL

El presente trabajo analizó la posibilidad de reúso del agua residual domiciliaria en la localidad Concepción del Bermejo, con el objetivo de mejorar la eficiencia del uso del agua de provisión domiciliaria. Para un área delimitada de Concepción del Bermejo (según figura 1) se sugirió una prueba piloto de tratamiento de aguas residuales para reúso. Para los cálculos de los caudales de vuelco a colectoras, se toman las denominaciones, definiciones y coeficientes para diseño de acuerdo con poblaciones de ENOHSA, según capítulo *2 Criterios de diseño*

Establecimiento del perfil del volumen residual a tratar

Para la provincia del Chaco, la dotación media de producción resultante es de 225 l/hab/día, con una dotación pico de producción de 449 l/hab/día. El coeficiente de retorno a cloacas está calculado en un 80% (UCPYFE, 2010); los datos de volúmenes son consistentes con la producción de la RO de Concepción del Bermejo en torno a los 1250 m^3/día.

Determinación del caudal de efluente a tratar en C. del Bermejo

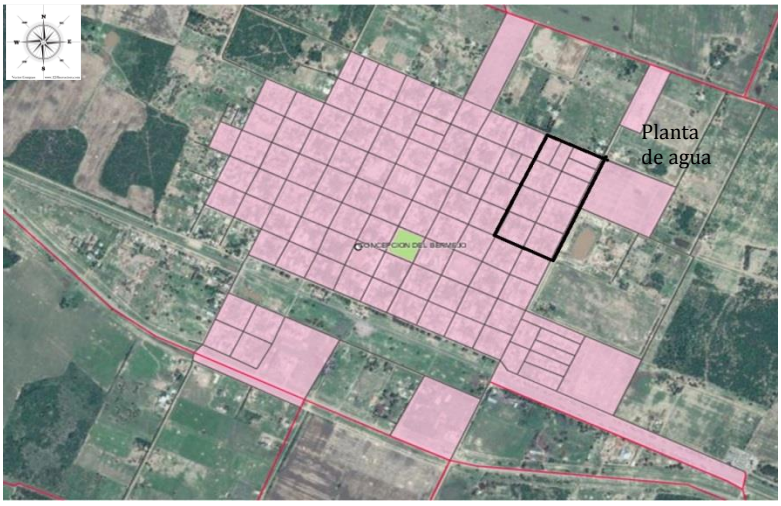

Figura 1 - Plano de la ciudad de Bermejo con marcación del sector de la prueba piloto y la ubicación de la planta de agua - Elaboración propia

1. Proyección demográfica para período de obras y final.

Para la determinación hipotética del universo para el período de ejecución del proyecto (P_A) se considerará población no se modificará sustantivamente, por lo que podemos asumir razonablemente que el número de 8 manzanas consideradas arrojaría un total de 1600 habitantes para el final de obra (año de habilitación, n=0), con una distribución semejante a la inicial.

Al final del período de diseño (n=20), la población (P_{20}= Población final, prevista para el último año del período del diseño planificado), los datos poblacionales no debieran haber sufrido una modificación sustancial.

Por otro lado, al tratarse de una prueba puntual en un segmento determinado de la población de Concepción del Bermejo –y no el diseño del servicio urbano de saneamiento para toda la ciudad-, se considera que puede trabajarse con un volumen determinado de modo constante.

Para el cálculo preliminar de la población calculamos que:

$$P_{20} = P0_{n=0} (P_A x \Delta_{anual} x T_1) + \Delta_{anual} x T_{20} x P_A$$

Siendo T_1 el tiempo transcurrido hasta el inicio de las obras y T_{20} los 20 años de proyección considerados en los parámetros de diseño de ENOHSA.

Siendo $\Delta_{anual} = 0$, en conclusión, y para el diseño de esta planta de tratamiento, se asumiría que

$$P_A = P_0 = P_{20}$$

2. Cálculo de caudales del efluente a tratar

Q_C, caudal medio diario del año: la circunscripción estaría produciendo diariamente una provisión media de agua de bebida igual a 1.600 hab x 225 l/hab/día = 360.000 l/día = 360 m^3/d de agua potable (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) Las aguas residuales diarias medias anuales producidas son 288 m^3/d (360 m^3/d x 0,8 de retorno a cloacas - ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Esto arroja un promedio horario de 12 m^3/h (288 m^3/d / 24 h).

Q_D, caudal horario medio del día de máximo volumen diario: las aguas residuales medias del día de máximo volumen producidas son 406 m^3/d (Q_{Dn} x α_1 = 288m^3/d x 1,40). El promedio horario es de 14 m^3/ (406 m^3/d/ 24h).

Q_{En}, caudal horario pico del día de máximo volumen diario: las aguas residuales pico del día de máximo volumen producidas son 32 m^3/h (Qc x α= 12 m^3/h x 2,66).

Q_B, caudal medio del día de mínimo volumen diario: las aguas residuales medias del día de mínimo volumen producidas son173 m^3/d (Qc x β_1= 288 m^3/d x 0,6). El promedio horario es de 7,2 m^3/h (173 m^3/d/ 24).

Q_A, caudal mínimo del día de mínimo volumen diario: las aguas residuales mínimas del día de mínimo volumen producidas son 86,5 m^3/d (Q_B x β_2 = 174 m^3/d x 0.50). El promedio horario es 3,6 m^3/h (86,5 m^3/d / 24).

Los valores de α y β surgen de las tablas consignadas en los manuales de ENOHSA.

En la tabla 6, se hace una síntesis de los caudales que se tienen en cuenta para el diseño.

Tabla 6 - Síntesis de caudales para diseño – Elaboración propia

	Día medio	Día máximo	Día mínimo
Q medios	288 m^3/d	406 m^3/d	173 m^3/d
Promedio /hora	12 m^3/h	14 m^3/h	7,2 m^3/h
Pico Máx. hora	-	32 m^3/h	-

Pico Mín. hora	-	-	3,6 m^3/h

La parte **hidráulica** de planta de tratamiento se diseñará con el mayor de dos datos Q_E x 0,8 o Q_D; 32 m^3/h x 0,8 = 25,6 m^3/h versus 14 m^3/h; se tomará 26 m^3/h. Si fuera bombeado se ajustará en función de la selección de las bombas.

El proceso del tratamiento en lagunas se diseñará con Q_C = 180 m^3/d y 7,5 m^3/h.

Diseño de la red de colección de efluentes

El cálculo de caudales del efluente a colectar, se diseñará con Q_E y se verificará con $Q_L = \alpha 2 \times Q_B$ para el arrastre de sólidos (ENOHSA, 2010), de modo que Q_L = 1,9 x 7,2 m^3/h = 13,7 m^3/h.

Para el diseño se deberán hacer los estudios de perfil estratigráfico, posición del nivel freático, agresividad potencial del suelo y el agua, métodos de excavación, estabilidad de las paredes de las zanjas y las precauciones a adoptar durante el relleno de las mismas, previstos en las normas ENOHSA Nº 11.

De acuerdo con las normas ENOHSA (Capítulo 2 *Criterios de diseño – Estudios preliminares para el diseño de las obras*), el tratamiento deberá localizarse entre los 500 y 1000 metros mínimos desde la zona de vivienda (ENOHSA, 2010).

Si se considera la dirección de los vientos predominantes, la localización más adecuada a la planta de tratamiento sería el NE, en la dirección general de ubicación de la planta potabilizadora con relación a la población.

Determinación del perfil de agua residual

Teniendo en cuenta las características particulares de estrés hídrico señaladas extensamente en el capítulo 2 por un lado, y que las concentraciones presentadas por Metcalf & Eddy se basan en los volúmenes de utilización de agua de provisión domiciliaria en Estados Unidos, -entre los consumos per cápita más altos del mundo (GreyWaterNet, 2014)-, por el otro, el trabajo consideró –en los casos que lo ameritan- una proporcionalidad que tuviera en cuenta la variación de volumen diario promedio en el año por persona. Por tanto, para el cálculo de la concentración de contaminantes por unidad de volumen, se asume que la masa de contaminante es la misma por persona y que la concentración es inversamente proporcional volumen descargado. Por tanto, siendo QCnCdelB = QCn USA /0,679 = 1,4722, se aplicó un ratio Δ =1.47 (QCn USA = QCnCdelB x 1.47), que corresponde a la proporcionalidad entre consumo promedio en Estados Unidos y el O de Chaco. El perfil se recoge en la tabla 7.

Tabla 7 - Perfil del agua residual para Concepción del Bermejo – Tabla propia de fuentes citadas

Característica agua residual / concentración constituyentes				
Parámetro	**Unidad**	**Nivel referencia**	**CdelB**	**Ref**
Alcalinidad *	mg/l (CO_3Ca)	100	158	5
HCO_{3-} *	mg/l	75	110	5
RAS	-	s/d	1,3	4
Ca *	mg/l	27.5	40,42	5
Mg *	mg/l	27.5	40,42	5
Na *	mg/l	s/d	50	4
K *	mg/l	11	16,17	5
Cloruros *	mg/l	35	44,1	1
SO_{4--}	mg/l	22.5	33,07	1
DBO_5 *	mg/l	220	211	1
DQO *	mg/l	500	460	1
Conductividad	µS/cm	0	390	5
ST *	mg/l	720	741	5
STD *	mg/l	500	499	5
SST *	mg/l	220	242	5
SSV *	mg/l	s/d	40	5
N total	mgN/l	s/d	72	1
N total kjeldahl *	mgN/l	40	58,8	1

N org. *	mgN/l	15	22,05	1
N-NH4+ *	mgN/l	25	36,75	1
$N\text{-}NO_3$	mgN/l	s/d	13	5
P total *	mgP/l	8	10	1
Grasas	mg/l	100	147	1
Colifecales **	UFC/100 ml	103	1470	2
H.Helmintos **	nº/l	103	1470	2
Al *	mg/l	0.15	0,22	1
As	mg/l	0,05	0,07	5
Be	mg/l	s/d	ND	5
Bo *	mg/l	0.25	0,36	1
Cd	mg/l	0,01	0,015	2
Co	mg/l	0,05	0,07	2

Cr	mg/l	0,1	0,14	2
Cu	mg/l	0,2	0,29	2
F	mg/l	0.35	0.35	3
Fe	mg/l	0.3	0,44	1
Hg	mg/l	s/d	ND	1
Li	mg/l	s/d	ND	1
Mn *	mg/l	0,3	0,44	4
Mo	mg/l	s/d	ND	5
Ni	mg/l	s/d	ND	5
Pb	mg/l	0,01	0,015	2
Se	mg/l	s/d	ND	5
Zn	mg/l	2	2,94	2

* Se toma el promedio del rango informado

**Se toma el valor más alto informado

. Para la tabla anterior, las referencias de interpretación son:

Q medio de retorno a cloacas para CdelB		
Volumen de agua potable / hab-día	225	l/hab/día
Retorno cloacas	80%	
Volumen cloacal / hab-día	180	l/hab/día

Relaciones para cálculos concentración y Q		
USA volumen cloacal / hab- día	265	l/hab/día
Relación volumen CdelB / USA/	0,679245283	
Δ ratio concentración CdelB / USA/ (265/180)	1,47	
Cantidad de habitantes a servir	1600	habs
Q aguas residuales medias /día	288	m^3

Fuentes de referencia	
Perfil Metcalf & Eddy	1
Perfil WHO / FAO	2
Perfil EPA	3
Calculado a partir de contribución al cloacal por ingesta diaria humana según FDA	4
Calculada a partir de permeado + tabla 3-7 de Metcalf & Eddy	5
Nota: Los números de más de 3 dígitos, se presentan sin decimales. Las trazas, se consignan con 2 decimales.	

3- POSIBLES REUSOS DEL AGUA RESIDUAL DOMICILIARIA TRATADA

Al construir el esquema de usos posibles de agua residual tratada, se partió fundamentalmente de los usos que considera de modo general la UE (Jordi Raso, 2012) y la EPA (EPA, 2012), ajustados por la realidad socio-económica de la localidad (punto 2.2), las preferencias manifestadas (Solidagro, 2016) (Solidagro,2015), las actividades productivas regionales (punto 2.2.3) y teniendo en cuenta las experiencias puntuales documentadas de ALC o Argentina. Al momento de determinar el perfil de agua para reúso luego del tratamiento, se toma una combinación ponderada por la exigencia mayor, entre la clasificación de la Organización Panamericana de la Salud y de la EPA (EPA, 2012), en los casos de eventual contacto humano. Siempre prevalece la presencia de una legislación nacional específica (como en el caso del arsénico). Así surge la determinación de los usos posibles del agua residual tratada recogida en la tabla 8.

Tabla 8 - Usos posibles para reutilización de efluentes tratados

Reúso posible	Riesgo de contacto humano	Situación
1. Irrigación de caminos parques y paseos	1.a. Sin acceso humano restringido	A evaluar
	1.b. Con acceso humano restringido	Posible
2. Agropecuario	2.a. Bebida de ganado	Posible
	2.b. Alimentos que no se procesan	Descartado
	2.c. Alimentos que se procesan industrialmente	Posible
	2.d. Cultivos para alimento de ganado	Posible
	2.e. Cultivos no alimenticios	Posible
3. Medioambiental	3.a. Recarga acuíferos	Descartado
	3.b. Recarga cuerpos superficiales de agua	Descartado
4. Paisajístico y recreativo	4.a. Con contacto incidental	Descartado
	4.b. Sin contacto directo	Posible
5. Industrial	5.a. Construcción	Posible
	5.b. Otros usos industriales	Improbable

Para la determinación de la calidad de agua prevista en cada reúso, se siguieron las fuentes habituales (FAO, OMS y aplicaciones nacionales de los estándares), según lo que se recoge en las tablas 9, 10 y 11. Por último, se tuvieron en cuenta las medidas de protección previstas en las guías de la OMS, según se recoge en la tabla 12.

Tabla 9 – Parámetros calidad de agua para irrigación - Elaboración propia a partir datos FAO

Parámetro	Unidad	Nivel guía
pH		6.5-8
Conductividad	µS/cm	700-3000
HCO_{3-}	me/l	1.5 - 8.5
RAS	-	3 a 9
N como $(NO_3\text{-}N)^3$	mg/l	5 a 30
P total	mg/l	8.6
K	mg/l	34.7
Colifecales	NMP/100 ml	1000
Huevos Helmintos	nº/l	< 1
Al	mg/l	5
As	mg/l	0.1
Be	mg/l	0.1
Cd	mg/l	0.01

Parámetro	Unidad	Nivel guía
Cl	me/l	4 - 10
Co	mg/l	0.05
Cr	mg/l	0.1
Cu	mg/l	0.2
F	mg/l	1
Fe	mg/l	5
Li	mg/l	2.5
Mn	mg/l	0.2
Mo	mg/l	0.01
Ni	mg/l	0.2
Pb	mg/l	5
Se	mg/l	0.02
Zn	mg/l	2

Tabla 10 - Parámetros de calidad del agua para bebida de ganado - Elaboración propia sobre parámetros FAO e INTA

Parámetro	Unidad	Nivel guía
pH		5 a 8.5
Dureza	mg/l (CO_3Ca)	3000
HCO_{3-}	mg/l	91.5 a 518
SO_4	mg/l	< 500

STD	mg/l	< 1000
N total	mg/l	5 a 30
$N0_2^-$	mg/l	<10
NO_3^-	mg/l	< 50
Al	mg/l	5

As	mg/l	0.2
Be	mg/l	0.1
Cd	mg/l	0.05
Cl	mg/l	140 a 350
Co	mg/l	1
Parámetro	**Unidad**	**Nivel guía**
Cr	mg/l	1
Cu	mg/l	0.5
F	mg/l	2
Fe	mg/l	1

Hg	mg/l	0.01
Li	mg/l	2.5
Mg	mg/l	250
Mn	mg/l	0.05
Mo	mg/l	0.01
Na	mg/l	3 a 9
Ni	mg/l	0.2
Pb	mg/l	0.1
Se	mg/l	0.05
Zn	mg/l	24

Tabla 11 - Parámetros guía de agua para vida acuática - Elaboración propia sobre fuente FAO

Parámetro	Unidad	Nivel guía
pH		6.5-8
Conductividad	µS/cm	500
Temperatura	ºC	< 20
O_2 disuelto	mg/l	9.5
Temperatura	ºC	> 20
O_2 disuelto	mg/l	6
N total	mg/l	5 a 30
N inorgánico dis.	mg/l	0.5
NO_x (sumados)	mg/l	0.5
NH_3	mg/l	0.05
P total	mg/l	0.05
Ortofosfato	mg/l	0.025
Colifecales	UFC/100 ml	10^3
Huevos Helmintos	nº/l	< 1
Al	mg/l	5
As	mg/l	0.1

Parámetro	Unidad	Nivel guía
Be	mg/l	0.1
Cd	mg/l	0.01
Cl	me/l	4 - 10
Co	mg/l	0.05
Cr	mg/l	0.1
Cu	mg/l	0.2
F	mg/l	1
Fe	mg/l	5
Li	mg/l	2.5
Mn	mg/l	0.2
Mo	mg/l	0.01
Ni	mg/l	0.2
Pb	mg/l	5
Se	mg/l	0.02
Zn	mg/l	2

Tabla 12 - Aplicación de las medidas de protección previstas en las guías de la WHO - Elaboración propia

Medidas de protección	**4.10.1.**	**4.10.2.**	**4.10.3.**	**4.10.4.**	**4.10.5.**
	R Cult	**Mt Irr**	**DieOff**	**Prc ali**	**Prt per**
1.b. Con acceso humano restringido	x	No aplica	No aplica	x	x
2.a. Bebida de ganado	No aplica	x	No aplica	x	x
2.c. Alimentos que se procesan industrialmente	x	x	x	x	x
2.d. Cultivos para alimento de ganado	x	x	x	x	x
2.e. Cultivos no alimenticios	x	No aplica	x	x	x
4.b. Sin contacto directo	No aplica	No aplica	No aplica	x	x
5.a. Construcción	No aplica	No aplica	No aplica	x	x

4- SISTEMAS NATURALES DE TRATAMIENTO PROPUESTOS

Sistema A

El primer sistema que se propone, estará compuesto por una cámara séptica, una laguna facultativa y una laguna de maduración. El diagrama del sistema A se recoge en la figura 2 (no en escala).

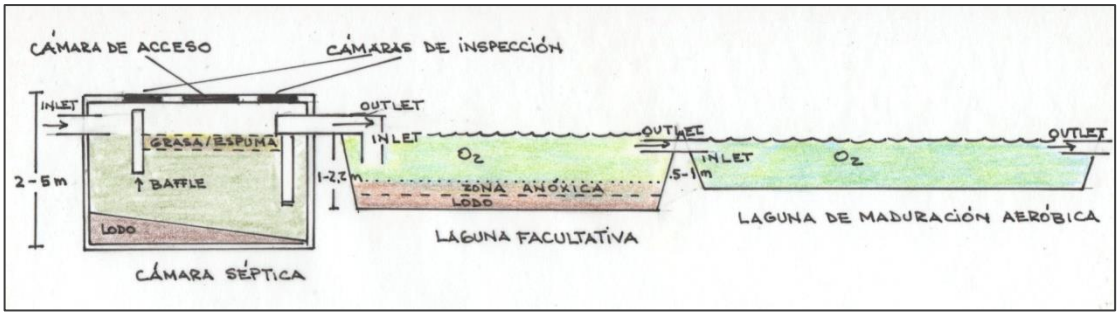

Figura 1 - Sistema A - Séptica, laguna facultativa, laguna de maduración - Elaboración propia

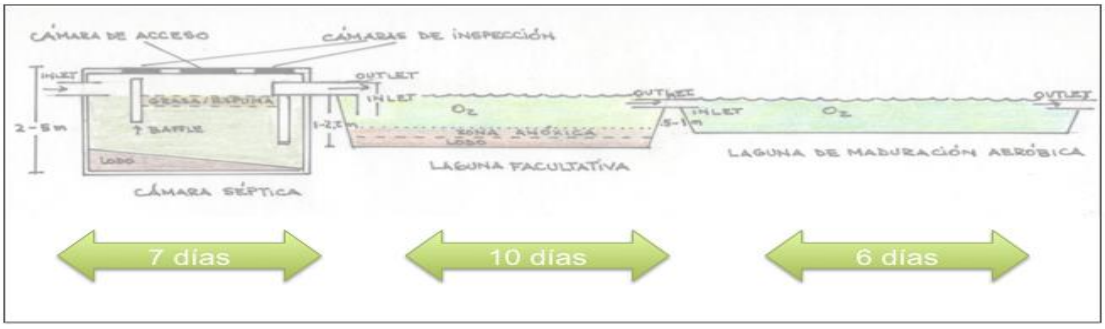

Figura 3 - Tiempos de retención del sistema A – Figura de elaboración propia

Los tiempos de retención en el sistema –figura 3- se han estimado de acuerdo con un criterio de utilización mínima de terreno y máxima simplificación. De acuerdo con estos dos criterios, los resultados obtenidos serían el mínimo esperable.

Sistema B

El segundo sistema propuesto estará compuesto por una cámara séptica, seguido por una serie de dos humedales de diferente diseño: *Horizontal Subsurface Flow* (HSSF) y *Free Water System (FWS)*, según se recoge en la figura 4 (no en escala).

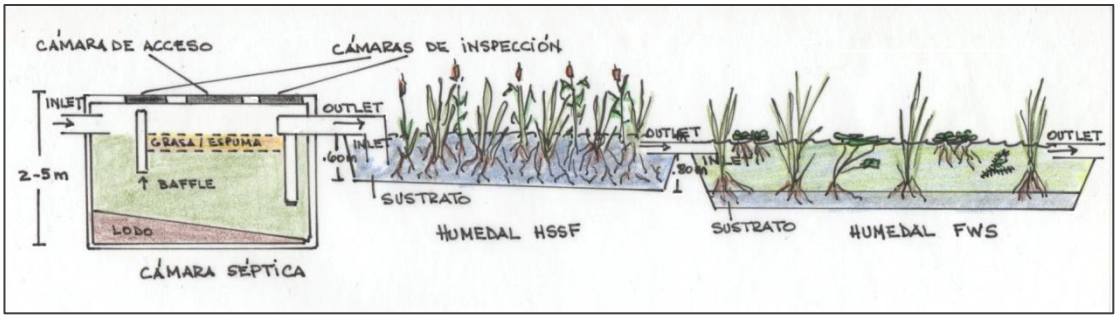

Figura 4 - Sistema B - Séptica, humedal HSSF, humedal FWS – Elaboración propia

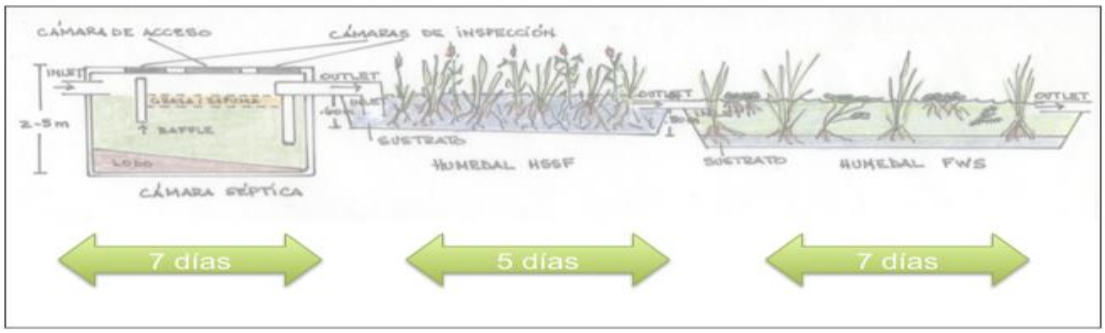

Figura 5 - Tiempos de retención del sistema B – Figura de elaboración propia

Los tiempos de retención en el sistema –figura 5- se han estimado de acuerdo con la bibliografía de base utilizada, sumado a un criterio de utilización mínima de terreno y máxima simplificación tecnológica.

5- RESULTADOS Y USOS POR APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO PROPUESTOS

Resultados tecnología por sistema A

El perfil estimado del efluente a la salida del sistema A –cámara séptica, laguna facultativa, laguna de maduración- se presenta a continuación en la tabla 13.

Tabla 13 - Perfil del efluente a la salida del sistema A y vinculación con reúsos posibles - Tabla propia

Constituyentes		Entrada	Salida	Reúsos posibles						
Parámetro	**Unidad**	**CdelB**		1.b.	2.a.	2.c.	2.d.	2.e.	4.b.	5.a.
pH			0,00	x	x	x	x	x	x	*
Alcalinidad	mg/l (CO_3Ca)	158	158,00	*	*	*	*	*	*	*
HCO_{3-}	mg/l	110	110,00		x				*	*
RAS		1,3	1,30	x	*	x	x	x	*	*
Ca	mg/l	40,42	40,42	*	*	*	*	*	*	*
Mg	mg/l	40,42	40,42	*	*	*	*	*	*	*
Na	mg/l	50	50,00	*	*	*	*	*	*	*
K	mg/l	16,17	16,17	x	*	x	x	x	*	*
Cloruros	mg/l	44,1	44,10	x	x	x	x	x	x	*
SO_{4--}	mg/l	33,07	33,07	*	x	*	*	*	*	*
DBO_5	mg/l	211	49,03	*	*	*	*	*	*	*
DQO	mg/l	460	98,67	*	*	*	*	*	*	*
Conductividad	µS/cm	390	390,00	*	x	*	*	*	x	x
ST	mg/l	741	259,35	*	*	*	*	*	*	x
STD	mg/l	500	500,00	*	x	*	*	*	*	x
SST	mg/l	242	242,00	*	*	*	*	*	*	x
SSV	mg/l	40	40,00	*	*	*	*	*	*	x
N total	mgN/l	72	22,90	*	x	*	*	*	x	x
N total kjeldahl	mgN/l	58,8	18,70	*	x	*	*	*	no	*
N org.	mgN/l	22,05	7,01	*	x	*	*	*	no	*
$N\text{-}NH_4+$	mgN/l	36,75	11,69	*	x	*	*	*	no	*
$N\text{-}NO_3$	mgN/l	13	4,13	x	x	x	x	x	no	*
P total	mgP/l	10	5,17	x	*	x	x	x	no	*
Grasas	mg/l	147	29,4	*	*	*	*	*	*	*
Colifecales	UFC/100 ml	1470	0,01	x	*	x	x	x	x	x
H.Helmintos	nº/l	1470	0,01	x	*	x	x	x	x	x
Al	mg/l	0,22	0,22	x	x	x	x	x	x	*
As	mg/l	0,0735	0,03	x	x	x	x	x	x	*
Be	mg/l	ND	ND	*	x	*	*	*	x	*
B	mg/l	0,36	0,34	x	*	x	x	x	*	*
Cd	mg/l	0,015	0,0001	*	x	*	*	*	x	*
Co	mg/l	0,07	0,05	x	x	x	x	x	x	*
Cr	mg/l	0,14	0,08	x	x	x	x	x	x	*
Cu	mg/l	0,29	0,001	x	x	x	x	x	x	*
F	mg/l	0,35	0,35	x	x	x	x	x	x	*
Fe	mg/l	0,44	0,16	x	x	x	x	x	x	*

Hg	mg/l	ND	ND	*	x	*	*	*	*	*
Li	mg/l	ND	ND	x	x	x	x	x	x	*
Mn	mg/l	0,028	0,02	x	x	x	x	x	x	*
Mo	mg/l	ND	ND	x	x	x	x	x	x	*
Ni	mg/l	ND	ND	x	x	x	x	x	x	*
Pb	mg/l	0,015	0,003	x	x	x	x	x	x	*
Se	mg/l	ND	ND	x	x	x	x	x	x	*
Zn	mg/l	2,94	0,94	x	x	x	x	x	x	*

Para la tabla anterior, las referencias son:

x	cumple con la calidad para el reúso
*	no se indicaron niveles guía para el parámetro en este reúso
no	no alcanza la calidad prevista para el reúso

1. Irrigación de caminos parques y paseos	1.a. Sin acceso humano restringido
	1.b. Con acceso humano restringido
2. Agropecuario	2.a. Bebida de ganado
	2.b. Alimentos que no se procesan
	2.c. Alimentos que se procesan industrialmente
	2.d. Cultivos para alimento de ganado
	2.e. Cultivos no alimenticios
3. Medioambiental	3.a. Recarga acuíferos
	3.b. Recarga cuerpos superficiales de agua
4. Paisajístico y recreativo	4.a. Con contacto incidental
	4.b. Sin contacto directo
5. Industrial	5.a. Construcción
	5.b. Otros usos industriales

Reúsos posibles a la salida del sistema A

El resumen de reúsos se presenta a continuación en la tabla 14.

Tabla 14 - Cuadro resumen de reúsos posibles a la salida del Sistema A - Tabla propia

Reúso posible	**Riesgo de contacto humano**	**Usos**
1. Irrigación de caminos parques y paseos	1.b. Con acceso humano restringido	Posible
2. Agropecuario	2.a. Bebida de ganado	Posible sin restricciones
	2.c. Alimentos que se procesan industrialmente	Recomendable si se cumplen barreras en cosecha y manipulación
	2.d. Cultivos para alimento de ganado	Recomendable si se cumplen barreras en cosecha y manipulación
	2.e. Cultivos no alimenticios	Recomendable si se cumplen barreras en cosecha y manipulación
4. Paisajístico y recreativo	4.b. Sin contacto incidental	No totalmente adecuado
5. Industrial	5.a. Construcción	Posible – con particular atención a barreras sanitarias
	5.b. Otros usos industriales	Posible de acuerdo con calidad requerida

Resultados tecnología sistema B

Un perfil posible del efluente a la salida del sistema B –cámara séptica, humedal HSSF, humedal FWS- se presenta a continuación en la tabla 15. No se incluyen aquellos parámetros que estaban dentro de norma antes de entrar a la cámara séptica.

Tabla 15 - Perfil del efluente a la salida del sistema B y vinculación con reúsos posibles - Tabla propia

Constituyentes		Entrada	Salida	Reúsos posibles						
Parámetro	**Unidad**	**Caracterización**		1.b.	2.a.	2.c.	2.d.	2.e.	4.b.	5.a.
pH			6,5-8	X	x	x	x	x	x	*
Alcalinidad	mg/l (CO_3Ca)	158	158	*	*	*	*	*	*	*
HCO_{3-}	mg/l	110	110,00		x				*	*
RAS		1,3	1,30	X	*	x	x	x	*	*
Ca	mg/l	40,42	40,42	*	*	*	*	*	*	*
Mg	mg/l	40,42	40,42	*	*	*	*	*	*	*
Na	mg/l	50	50,00	*	*	*	*	*	*	*
K	mg/l	16,17	16,17	X	*	x	x	x	*	*
Cloruros	mg/l	44,1	44,10	X	x	x	x	x	x	*
SO_{4--}	mg/l	33,07	33,07	*	x	*	*	*	*	*
DBO_5	mg/l	211	137,15	*	*	*	*	*	*	*
DQO	mg/l	460	276,00	*	*	*	*	*	*	x
Conductividad	µS/cm	390	390,00	*	x	*	*	*	x	x
ST	mg/l	741	259,35	*	*	*	*	*	*	x
STD	mg/l	500	500,00	*	x	*	*	*	*	x
SST	mg/l	242	242,00	*	*	*	*	*	*	x
SSV	mg/l	40	40,00	*	*	*	*	*	*	x
N total	mgN/l	72	25,20	*	x	*	*	*	x	X
N total kjeldahl	mgN/l	58,8	20,58	*	x	*	*	*	no	*
N org.	mgN/l	22,05	7,72	*	x	*	*	*	no	*
$N\text{-}NH_4+$	mgN/l	36,75	12,86	*	x	*	*	*	no	*
$N\text{-}NO_3$	mgN/l	13	4,55	X	x	x	x	x	no	*
P total	mgP/l	10	9,80	X	*	x	x	x	no	*
Grasas	mg/l	147	29,40	*	*	*	*	*	*	*
Colifecales	UFC/100 ml	1470	0,08	X	*	x	x	x	x	X
H.Helmintos	nº/l	1470	0,01	X	*	x	x	x	x	X
Al	mg/l	0,22	0,22	X	x	x	x	x	x	*
As	mg/l	0,0735	0,02	X	x	x	x	x	x	*
Be	mg/l	ND	ND	*	x	*	*	*	x	*
B	mg/l	0,36	0,32	X	*	x	x	x	*	*
Cd	mg/l	0,015	0,0001	*	x	*	*	*	x	*
Co	mg/l	0,07	0,05	X	x	x	x	x	x	*
Cr	mg/l	0,14	0,08	X	x	x	x	x	x	*
Cu	mg/l	0,29	0,001	X	x	x	x	x	x	*
F	mg/l	0.35	0,35	X	x	x	x	x	x	*
Fe	mg/l	0,44	0,16	X	x	x	x	x	x	*
Hg	mg/l	ND	ND	*	x	*	*	*	*	*
Li	mg/l	ND	ND	X	x	x	x	x	x	*
Mn	mg/l	0,028	0,01	X	x	x	x	x	x	*
Mo	mg/l	ND	ND	X	x	x	x	x	x	*
Ni	mg/l	ND	ND	X	x	x	x	x	x	*
Pb	mg/l	0,015	0,002	X	x	x	x	x	x	*
Se	mg/l	ND	ND	X	x	x	x	x	x	*
Zn	mg/l	2,94	0,22	X	x	x	x	x	x	*

Para la tabla anterior, las referencias son:

x	cumple con la calidad para el reúso
*	no se indicaron niveles guía para el parámetro en este reúso
no	no alcanza la calidad prevista para el reúso

1. Irrigación de caminos parques y paseos	1.a. Sin acceso humano restringido
	1.b. Con acceso humano restringido
2. Agropecuario	2.a. Bebida de ganado
	2.b. Alimentos que no se procesan
	2.c. Alimentos que se procesan industrialmente
	2.d. Cultivos para alimento de ganado
	2.e. Cultivos no alimenticios
3. Medioambiental	3.a. Recarga acuíferos
	3.b. Recarga cuerpos superficiales de agua
4. Paisajístico y recreativo	4.a. Con contacto incidental
	4.b. Sin contacto directo
5. Industrial	5.a. Construcción
	5.b. Otros usos industriales

Resumen de usos posibles a la salida del sistema B

En la tabla 16 se presenta una síntesis de usos posibles del efluente tratado a la salida del sistema.

Tabla 16 - resumen de usos posibles a la salida del sistema B

Reúso posible	**Riesgo de contacto humano**	**Uso**
1. Irrigación de caminos parques y paseos	1.b. Con acceso humano restringido	Limitado a las superficies con acceso humano restringido
2. Agropecuario	2.a. Bebida de ganado	Posible sin restricciones para ganado adulto
	2.c. Alimentos que se procesan industrialmente	Recomendable si se cumplen barreras en cosecha y manipulación
	2.d. Cultivos para alimento de ganado	Recomendable si se cumplen barreras en cosecha y manipulación
	2.e. Cultivos no alimenticios	Recomendable si se cumplen barreras en cosecha y manipulación
4. Paisajístico y recreativo	4.b. Sin contacto incidental	Posible con restricciones serias por posible eutrofización
5. Industrial	5.a. Construcción	Ilimitado con cloración previa
	5.b. Otros usos industriales	Limitado al caudal y calidad exigido. Probable tratamiento previo.

6- CONCLUSIONES

Los sistemas propuestos están dentro de los tratamientos biológicos de tipo natural, evitando los reactores mecánicos convencionales y por tanto sin utilización de energía o con un consumo energético mínimo.

El sistema de tratamiento (llamado sistema A) compuesto por cámara séptica - laguna facultativa - laguna de maduración se basa en una tecnología en estado de desarrollo avanzado y evaluada internacionalmente. El efluente se puede manejar de un modo más acotado, previendo los volúmenes

necesarios para planificar una actividad productiva concreta, con un caudal de salida constante y por tanto previsible en su aplicación a actividades de riego agrícola o como bebida de ganado, así como para actividades industriales. Además, al ser el tratamiento por lagunas un sistema impulsado a nivel provincial por la APA, se encuentra en etapa de mayor monitoreo y desarrollo de pruebas piloto.

El segundo sistema presentado (llamado sistema B), compuesto por cámara séptica - humedal tipo HSSF - humedal tipo FWS, presenta la doble función de tratamiento de las aguas residuales y de generar un fin en sí mismo: control búfer de inundaciones, secuestro de carbono y hábitat para la vida silvestre, en un sistema multipropósito. Se puede usar de manera similar al sistema anterior; sin embargo, le agrega a aquél la creación de un hábitat adecuado para la vida silvestre, a la vez que otorga una apariencia estética al tratamiento del líquido cloacal. Los contaminantes son removidos a través del mismo proceso que en los humedales naturales; sin embargo, en los humedales artificiales se procede bajo condiciones más controladas, con diseño de ingeniería hidráulica planificado. Los humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales municipales se han desarrollado considerablemente de modo internacional en las dos últimas décadas. Este desarrollo incluye una tecnología confiable, que está siendo aplicada también en el tratamiento de algunos efluentes industriales y de todos los efluentes agrícolas.

La calidad final de efluente obtenido en cualquiera de los dos sistemas propuestos, abre posibilidades de reúso del agua dulce, dentro de parámetros considerados aceptables para el medioambiente y para algunas actividades productivas agrícolas e industriales, con características de inocuidad para el ser humano.

El cumplimiento del ODS 6 en nuestro país, lleva de la mano a considerar de modo particular a las localidades que se encuentran bajo estrés hídrico. En ese sentido, la puesta en marcha de proyectos de reúso de aguas residuales –particularmente donde son altamente costosas las etapas de tratamiento para alcanzar calidad de agua de bebida-, está de acuerdo con las tendencias internacionales y cobra una importancia capital.

ENOHSA. (1993). *Normas de estudio, criterios de diseño y presentación de proyectos.* Buenos Aires: Ministerio de Economía - Obras y Servicios Públicos.
ENOHSA. (2010). *http://www.enohsa.gob.ar/*. Retrieved 2016 йил 22-01
EPA. (1988). *Constructed wetlands and aquatic plants systems for Municipal wastewater treatment.* Cincinnatti: USEPA.
EPA. (1988). *Design manual - Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment.* Cincinnati: Office of Research and Development.
EPA. (1992). *Wastewater treatment manuals - Treatment systems for small communities, business, leisure, centres and hotels.* Washington DC: Office of water.
EPA. (2003). *Pathogen / vector attraction - Reduction in sewage sludge.* Washington DC: Office of water.
EPA. (2011). *Principles of Design and Operations of Wastewater Treatment Pond Systems for Plant Operators, Engineers, and Managers.* Cincinnati, Ohio: USEPA.
EPA. (2012). *Guidelines for Water Reuse.* Washington DC: Office of water.
FAO. (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture .* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Natural Resources and Enviroment. Rome: FAO.
FAO/OMS. (2011). *Guía FAO/OMS para la aplicación de principios y procedimientos de análisis de riesgos en situciones de emergencia relativas a la inocuidad de los alimentos.* Roma: FAO-OMS.
INDEC. (2011). *indec.gov.ar*. Retrieved 2016 йил 22-01 from Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
Robert H. Kadlec, S. W. (2009). *Treatment Wetlands - Second Edition.* London: CRC Press.

Rohrmann, H. (2013). Panorama Hídrico Provincial. *Director Estudios Hídricos Administración Provincial del Agua,.* Resistencia, Chaco: Dirección de Estudios Hídricos. Administración Provincial del Agua.
Solidagro. (2015). *Documentación de Informe de Viajes de Trabajo.* Buenos Aires: Archivo interno Solidagro Asociación Civil.
Solidagro. (2016). *Informes de viaje - Febrero 2016.* Buenos Aires.
UCPYPFE. (2010). Herramientas para el Proyecto Norte Grande - Préstamo BIRF 8032-AR. Buenos Aires: Ministerio de Planificación.
Vymazal. (2008). Constructed wetlands for wastewater treatment. Constructed wetlands for wastewater treatment: a review (p. 16). Trebon, República Checa: M y Dalwani R .
WHO. (2004). *Water Treatment and Pathogen Control.* Padstow, Cornwall, UK : IWA Publishing, Alliance House.
WHO. (2006). *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater - Volume 2.* Paris: WHO Library.
WHO. (2011). *Guidelines for drinking water quality - 4th edition.* Switzerland: WHO Library.