

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-02-08

Artículos

Contaminación de acuíferos y eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales en centros urbanos de Itapúa, Paraguay

Aquifer contamination and efficiency of wastewater treatment plants in urban centers of Itapúa, Paraguay

Alicia Raquel Eisenkölbl¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9082-7973>

Rafaela Laino-Guanes², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3045-5108>

Christian Vogt-Penzkofer³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6683-4417>

Antonio Benítez-Cañiza⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5591-7375>

¹Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional de Itapúa, Paraguay, aeisenkolbl1@gmail.com

²Centro de Investigación del Chaco Americano, Paraguay, rafilaino@gmail.com

³Universidad Nacional de Asunción, Paraguay, cvogt@hotmail.de

⁴Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Paraguay, antoniobenitez25@gmail.com

Autora para correspondencia: Alicia Raquel Eisenköbl,
aeisenkolbl1@gmail.com

Resumen

La investigación analiza la calidad del agua subterránea y la eficacia del funcionamiento de dos plantas de tratamiento de efluentes domiciliarios en dos centros urbanos de Paraguay, así como la presencia de metales pesados en lodos residuales de ambas plantas de tratamiento. Para analizar la calidad del agua subterránea se recabaron datos de 59 muestreos de agua de 17 pozos profundos obtenidos en un periodo de 10 años entre 2006 y 2016. Para la evaluación del funcionamiento de las plantas de tratamiento se determinó la calidad de los efluentes luego del proceso de depuración. En los lodos generados en ambas plantas se analizó la presencia de metales pesados (Pb, Cr total, Cd y Hg). Los resultados obtenidos se contrastaron con legislaciones nacionales e internacionales vigentes. Los datos cuantitativos se procesaron estadísticamente mediante análisis de varianza y contraste de medias (test de Duncan) con margen de error de 5 %. Los principales resultados indican contaminación microbiológica del agua subterránea (acuífero Guaraní). Sin embargo, los parámetros físico-químicos analizados estaban dentro de los rangos establecidos por las normativas vigentes. Se identificó una inadecuada gestión en la planta de tratamiento de aguas residuales en uno de los centros urbanos (Hohenau). Se detectó presencia de Pb, Cr y Hg, a pesar de que las concentraciones se mantuvieron dentro de los rangos permisibles. Para salvaguardar la salud pública y el

ambiente tanto a nivel local como regional es imperativo aplicar plenamente el marco legal y la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Palabras clave: recursos hídricos, calidad de agua, planta de tratamiento de aguas residuales domiciliarias, gobernabilidad del agua, sustentabilidad de recursos hídricos.

Abstract

The research analyzes groundwater quality and the efficiency of the operation of household effluent treatment plants in two urban centers in Paraguay, as well as the presence of heavy metals in waste sludge from both treatment plants. To analyze groundwater quality, data was collected from 59 water samples from 17 deep wells obtained over a 10-year period between 2006 and 2016. The quality of the effluents was determined after the purification process. The sludge generated in both plants was analyzed for the presence of heavy metals (Pb, total Cr, Cd and Hg). The results obtained were compared with current national and international legislation. Quantitative data was statistically processed by analysis of variance and contrast of means (Duncan's test) with a 5 % margin of error. The main results indicate microbiological contamination of groundwater (Guarani aquifer); however, the physical-chemical parameters analyzed were within the ranges established by current regulations. Inadequate management of the wastewater treatment plant in one of the urban centers (Hohenau) was identified. The presence of Pb, Cr and Hg was detected, even though the concentrations remained within the permissible ranges. To safeguard public health and the environment,

both locally and regionally, it is imperative to fully enforce the legal framework and the implementation of integrated water resources management.

Keywords: Water resources, water quality, household wastewater treatment plant, sustainability of water resources.

Recibido: 13/09/2022

Aceptado: 12/01/2024

Publicado *online*: 19/01/2024

Introducción

Los acuíferos son fuentes de aguas subterráneas esenciales para la vida y el funcionamiento de los ecosistemas; aportan agua a los ríos, lagos, manglares y pantanos; son indispensables para la sobrevivencia de los bosques en regiones de clima seco o tropical; en muchas partes del mundo abastecen a las ciudades y a los campos; además sirven de insumo para diversas actividades económicas (Hirata, Vieira, Susko, Villar, & Marcellini, 2019).

El acuífero Guaraní es el tercer reservorio más grande de aguas continentales subterráneas del mundo. Se extiende por partes del subsuelo de Paraguay, Argentina, Brasil y Uruguay; con una superficie total de 1 084 063 km², se encuentra enteramente en la cuenca del Río de la Plata. El agua que se infiltra en esta cuenca genera la mayor recarga de dicho acuífero (García & Faggioli, 2018; Zarrilli, 2018). Además del acuífero Guaraní y otros acuíferos importantes (Patiño e Yrendá), el

Paraguay también se caracteriza por una compleja red hídrica que define la importancia estratégica que constituye para el desarrollo del Paraguay la gestión integrada de los recursos hídricos transfronterizos (CIC, 2004).

A pesar de la riqueza hídrica que posee el Paraguay tanto superficial como subterránea, el acceso a servicios básicos no es equitativo en el país. Además, en las áreas urbanas no se cumplen con los estándares de saneamiento requeridos. Por ejemplo, ante la falta del servicio de alcantarillado y saneamiento, gran parte de las aguas domiciliarias y de efluentes industriales se vierten de forma directa en las calles o en los cursos hídricos, lo cual genera consecuencias ambientales adversas (MOPC, 2018). Otro problema recurrente en la gestión del recurso hídrico en el país es la falta de información y actualización sobre la calidad del agua tanto superficial como subterránea. Además de ello, tampoco existe información (o es muy escasa) sobre la calidad del agua de los efluentes domiciliarios que son vertidos a los cauces hídricos.

Por estas razones, en este trabajo se presentan datos de calidad del agua desde su origen (acuífero) hasta su depuración luego ser utilizada y sometida al proceso de tratamiento de aguas residuales. Se analizan parámetros microbiológicos y físico-químicos del agua en dos centros urbanos, con el propósito de generar información que aporte al conocimiento de la calidad y del manejo de los recursos hídricos del Paraguay. Los objetivos de este estudio fueron analizar la calidad del agua subterránea de los pozos que abastecen a dos centros urbanos de Itapúa, medir la eficiencia del funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales de ambas ciudades e identificar la presencia de metales pesados en lodos residuales de ambas plantas.

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en dos microcuencas que forman parte de la gran cuenca del río Paraná. Ambas microcuencas están ubicadas en el departamento de Itapúa, Paraguay: la microcuenca del arroyo Abbeg, que drena sus aguas al arroyo Itakaguaré, y la microcuenca de un arroyo sin nombre que drena sus aguas al arroyo Capiíbary (Figura 1).

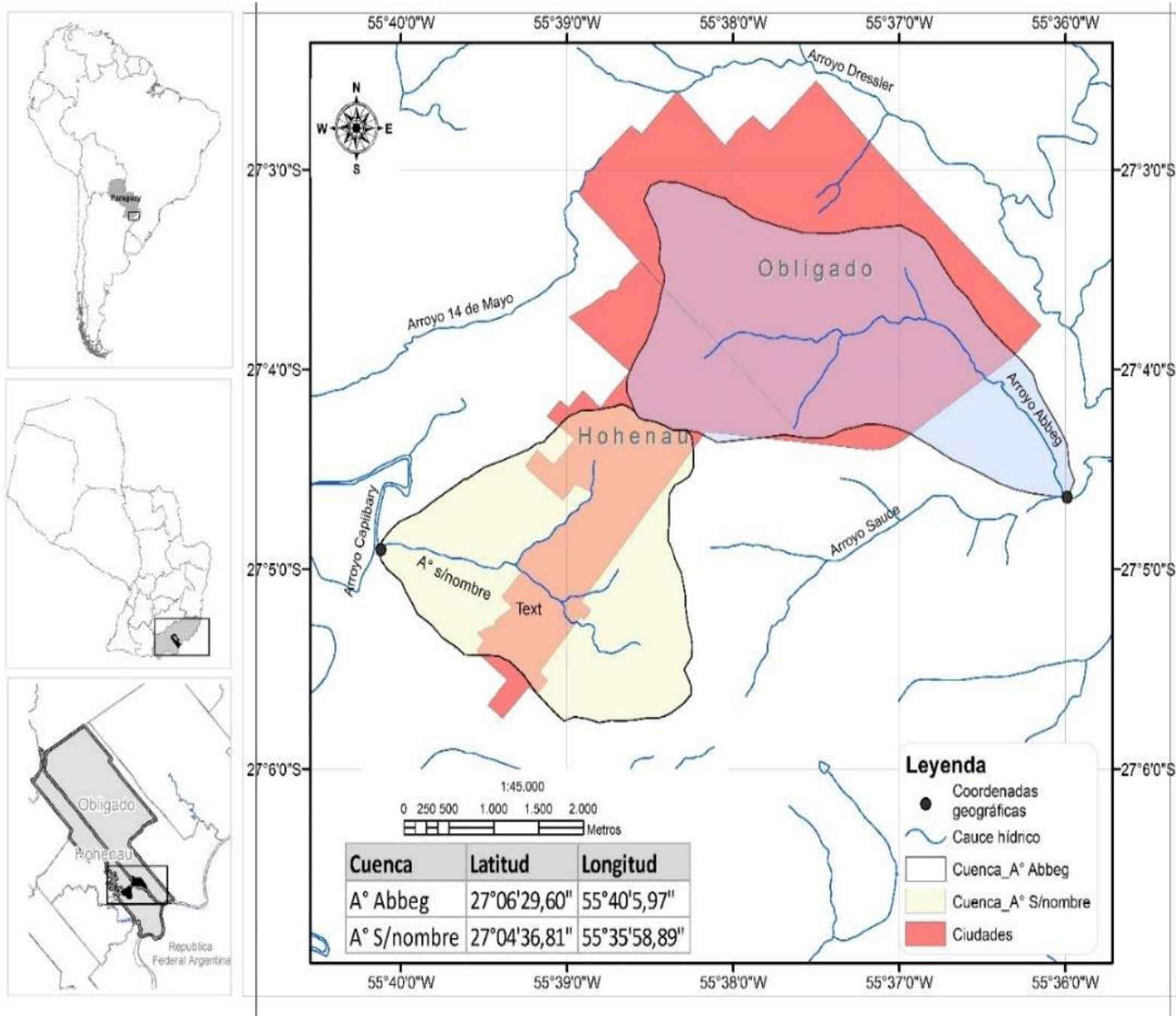


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en Paraguay en el ámbito distrital. Microcuencas ubicadas en el departamento de Itapúa (distritos de Hohenau y Obligado) y sus coordenadas geográficas.

En la microcuenca del arroyo Abbeg se localiza gran parte del centro urbano de Obligado (Figura 2), por lo tanto, en adelante se denominará microcuenca O, la cual tiene una superficie de 741 ha y su cauce principal tiene una longitud de 4 850 m. La microcuenca del arroyo sin nombre se ubica el centro urbano de Hohenau (Figura 3) y por lo tanto se denominará microcuenca H, la cual cuenta con una superficie de 598 ha y la longitud de su cauce es de 3 217 m.

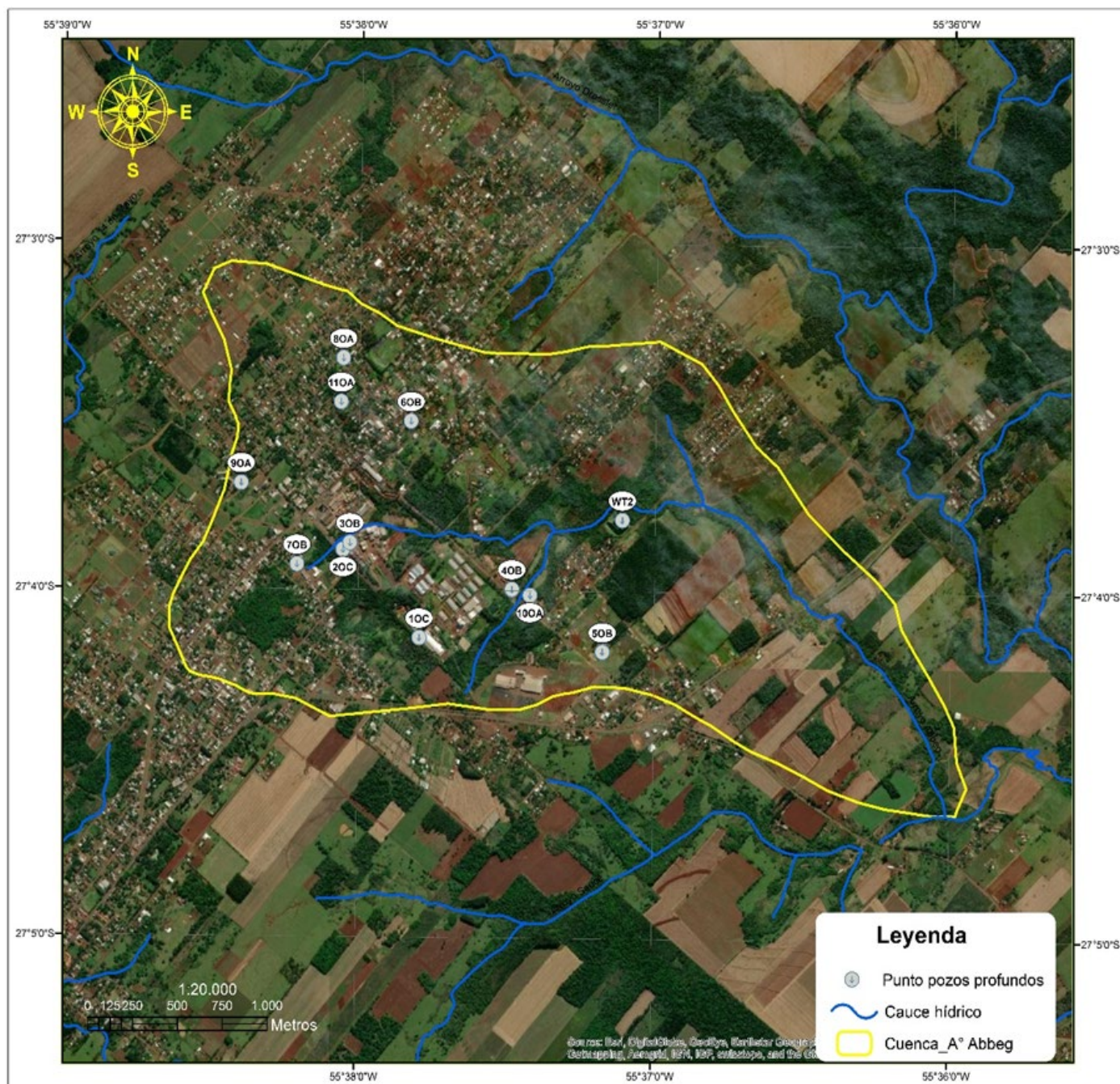


Figura 2. Ubicación de los 11 pozos profundos y de la planta de tratamiento de aguas residuales de Obligado (WT2) ubicados en la microcuenca O.

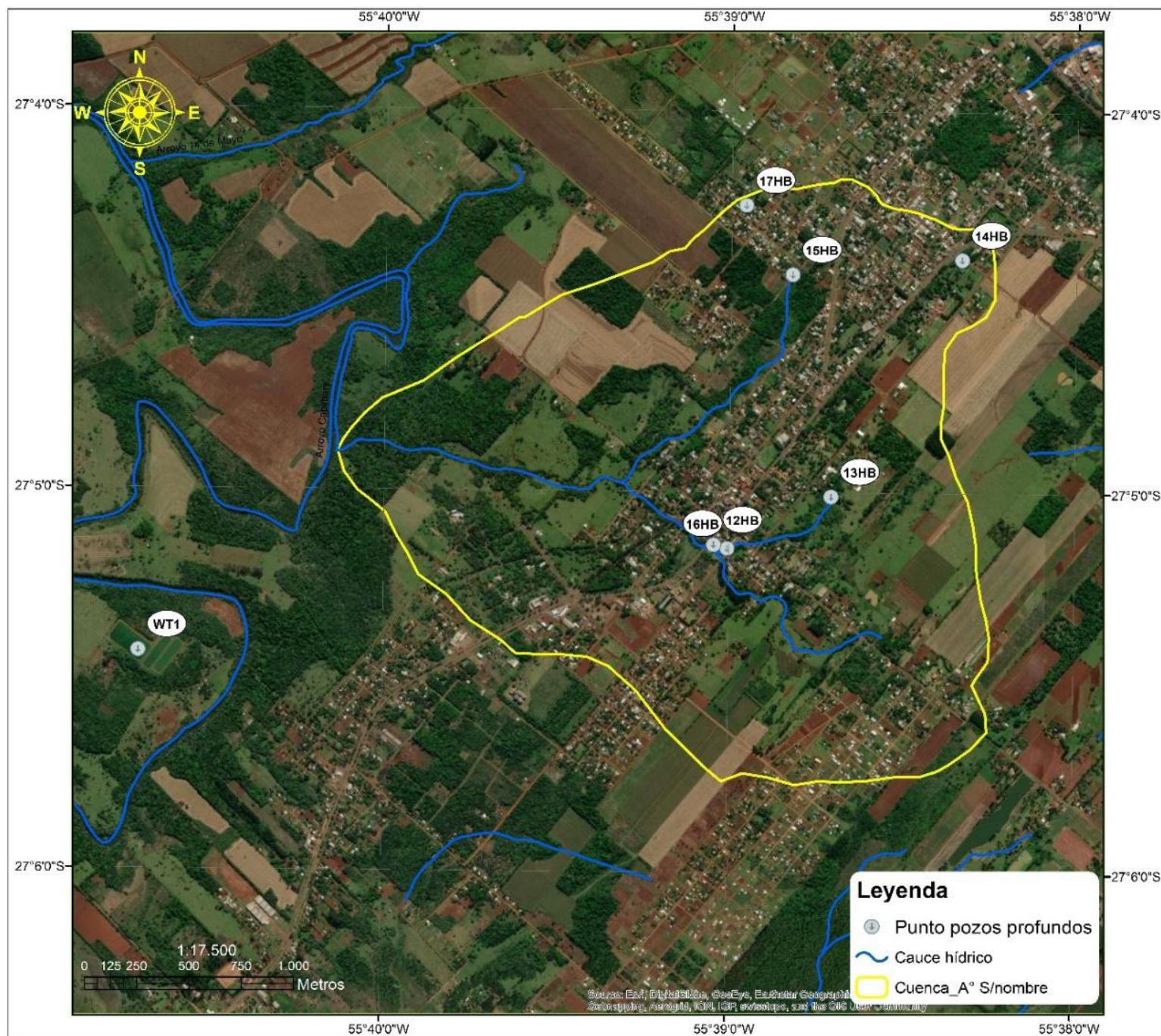


Figura 3. Ubicación de los seis pozos profundos y de la planta de tratamiento de aguas residuales de Hohenau (WT1) ubicados en la microcuenca H.

La zona de estudio se caracteriza por su elevada riqueza hídrica, asentada sobre el acuífero Guaraní. Está conformada por rocas sedimentarias de areniscas que almacenan grandes volúmenes de agua en los espacios porosos que presentan (Houben *et al.*, 2012). En el área de estudio hay de manera predominante dos tipos de suelos: ultisol 10 en las partes altas y medias de las cuencas, y en menor proporción ultisol 2 en las partes bajas de ambas cuencas. El ultisol 10 se da sobre roca basáltica (formación B) y en menor extensión sobre areniscas (formación A), pero siempre en lomadas con buen drenaje superficial. Las clases de suelo se clasifican como II, III y V, con predominio de clase III: pendientes del 8 al 15 %, profundidad efectiva del suelo de 75 a 100 cm, drenaje y permeabilidad rápida (Gorostiaga *et al.*, 1995).

Materiales y métodos

Calidad del agua subterránea

Para evaluar la calidad del agua se emplearon los resultados de los análisis de laboratorio de 11 pozos profundos. Estos datos fueron suministrados por propietarios privados (PP) y por las Juntas de Saneamiento (JS), que son las entidades encargadas de proveer agua a las comunidades. Los parámetros analizados fueron los siguientes: a) microbiológico: coliformes totales; b) físico: pH; c) químicos: alcalinidad, aluminio, amonio, calcio, cloruros, cobre, dureza total, fosforo, hierro, magnesio, nitrato, potasio, sodio y sulfatos. Los resultados se compararon con los umbrales establecidos en las normativas ambientales relacionadas con la

calidad del agua para el consumo humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) y las Normas Oficiales Paraguayas Erssan (Erssan, 2000) para determinar si se presenta o no deterioro en la calidad del agua. Una vez que se identificaron los parámetros de calidad de agua afectados (contaminación), se relacionaron estos datos con las precipitaciones y con la formación geológica para identificar las posibles causas.

Los análisis de agua se efectuaron entre 2006 y 2016, con excepción de los años 2007 y 2011, en los cuales no se encontró información disponible. Los datos de 2013 se descartaron por la baja confiabilidad que presentaron debido a que mostraron el mismo valor en todos los puntos de muestreo. En total, se analizaron 59 muestras, de las cuales seis se descartaron de los análisis microbiológicos por contar con un solo dato. Las muestras no fueron similares en cantidad de tomas por año. Las características de construcción y formación geológica de los pozos se describen en la Tabla 1. Los pozos se codificaron para un mejor manejo de los datos y el cálculo estadístico de los mismos. De los 17 pozos ubicados en la zona de estudio, 11 corresponden a la microcuenca O y 6 a la microcuenca H (Tabla 1, Figura 2 y Figura 3).

Tabla 1. Información de los pozos profundos del área de estudio, año de construcción, fuente de la información, profundidad, cota, formación geológica, y cantidad de muestras de agua y año de toma de la muestra.

Código	Año de construcción	Fuente de la información	Profundidad (m)	Cota msnm	Formación geológica	Cantidad de muestras (año)
1OC	2002	PP	140	174	Basalto/arenisca	1 (2010)
2OC	1994	PP	235	163	Basalto/arenisca	1 (2010)
3OB	2002	PP	171	165	Basalto	1 (2010)
4OB	2007	PP	102	149	Basalto	1 (2010)
5OB	2004	PP	105	163	Basalto	1 (2010)
6OB	1995	PP	105	190	Basalto	1 (2010)
7OB	1979	JS	60	165	Basalto	4 (2006-2008-2009-2014)
8OA	1990	JS	203	203	Arenisca	6 (2008-2010-2012-2013)
9OA	1996	JS	141	197	Arenisca	2 (2008-2009)
10OA	1999	JS	150	148	Arenisca	7 (2006-2008-2009-2012-2013-2014-2016)
11OA	2002	JS	160	186	Arenisca	3 (2006-2008-2009)
12HB	1984	JS	71	164	Basalto	5 (2006-2013-2015-2016)

Código	Año de construcción	Fuente de la información	Profundidad (m)	Cota msnm	Formación geológica	Cantidad de muestras (año)
13HB	1991	JS	167	186	Basalto	6 (2006-2013-2015)
14HB	2000	JS	146	194	Basalto	6 (2006-2013-2014-2015)
15HB	2001	JS	205	173	Basalto	3 (2014-2015-2016)
16HB	2004	JS	75	160	Basalto	6 (2006-2014-2015-2016)
17HB	2013	JS	180	184	Basalto	5 (2014)

O = microcuenca O (distrito de Obligado)

H = microcuenca H (distrito de Hohenau)

A = areniscas

B = basalto

C = combinado (basalto sobre areniscas)

JS = Junta de Saneamiento

PP = pozos privados

La nomenclatura para la identificación de cada pozo incluye un número, seguido de la letra correspondiente a la microcuenca; las letras A-B-C representan el material de origen (arenisca, basalto y combinado, respectivamente).

En la Figura 2 se puede apreciar la ubicación de los 11 pozos junto con la planta de tratamiento de aguas residuales de Obligado, la cual está designada con la etiqueta WT2.

En la Figura 3 se observa la ubicación de los seis pozos y de la planta de tratamiento de aguas residuales de Hohenau, que se identifica con la nomenclatura WT1.

Análisis estadístico

Se utilizó el análisis de varianza y contraste de medias para la identificación de diferencias significativas entre las variables; se aplicó la prueba de Duncan al 5 % de significancia. Para los análisis se usó el programa estadístico Infostat versión 2017 (Di Rienzo *et al.*, 2017). Para el análisis de parámetros se han descartado pozos con un solo dato debido a que genera una dispersión estadística muy marcada.

Eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias (PTAR)

A continuación, se describen las características de las PTAR ubicadas en el área de estudio:

1. PTAR Hohenau consta de tres piletas aerobias y un espejo de agua de 3.2 ha. Abarca 2 063 usuarios y está proyectada para 10 829. Funciona desde el año 2006. Para una mejor presentación de resultados se codificaron los puntos muestreo: el primer punto (P1) es la entrada; se pasa por los tres puntos (piletas) intermedios (P2, P3 y P4); el último punto (P5) es la salida del agua.
2. PTAR Obligado consta de desarenador, sistema RAFA combinado con dos piletas facultativas y un espejo de agua de 0.61 ha. Abarca 2

291 usuarios y está proyectada para 10 000. Funciona desde el año 2013. Para una mejor presentación de resultados se codificaron los puntos de muestreo: el primer punto (P1) la entrada y el último punto (P5) la salida del agua; se pasa por el sistema RAFA (P2) combinado con dos piletas facultativas (P3 y P4).

En cuanto a los datos utilizados, para la PTAR de Hohenau se utilizaron datos del año 2010, y para la de Obligado datos de los años 2014, 2015 y 2016. Para este estudio se tomaron nuevas muestras en ambas PTAR, según el Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN, 2001), en dos épocas de 2017: una en marzo (otoño) y otra en septiembre (primavera). Los resultados de los análisis se compararon con los umbrales establecidos en la Ley 1614/2000 y en la Resolución 222/2002, que establece el padrón de calidad de las aguas en Paraguay.

Metales pesados

Para cada muestra se tomó 1 kg de lodo en cada PTAR, posteriormente se remitieron a la Universidad Nacional de Misiones (UNAM), Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales (FCEQYN), Programa Efluentes Industriales y Urbanos. Los metales analizados fueron Cr total, Cd, Pb y Hg. Para el análisis del Cr total, Cd y Pb se utilizó el método de espectrometría de absorción atómica con aspiración de llama según EPA600/R-94/111 Método 200.2 con espectrofotómetro de AA Analyst 700, utilizando los protocolos de la UNAM-FCEQYN. Para el caso del Hg, se usó la espectrometría de absorción atómica de marca AA Perkin Elmer, con inyección en flujo con generación de vapor frío; la muestra se preparó

según EPA600/R-94/FIAS/MHS utilizando los protocolos de la UNAM-FCEQYN. Los resultados se contrastaron con las normas de México (NOM-004; Semarnat, 2002); de EUA (USEPA 503; USEPA, 1995), y de la Comunidad Europea (CEC, 1986) debido a que Paraguay no cuenta con normativa para metales pesados en lodos.

Resultados

Calidad del agua subterránea

Parámetros microbiológicos

Las aguas subterráneas presentaron contaminación microbiológica, específicamente por presencia de coliformes totales. Sin embargo, todos los valores de los parámetros físico-químicos se encontraron dentro de los límites establecidos en la normativa nacional de la Ley N° 1614/2000 (Erssan, 2000) y en la norma de calidad de agua de la OMS (2011). Las concentraciones de coliformes totales detectadas variaron entre 10 UFC/100 ml en los pozos de Hohenau y 326 UFC/100 ml, que llegaron a alcanzar en los pozos de Obligado (Figura 4).

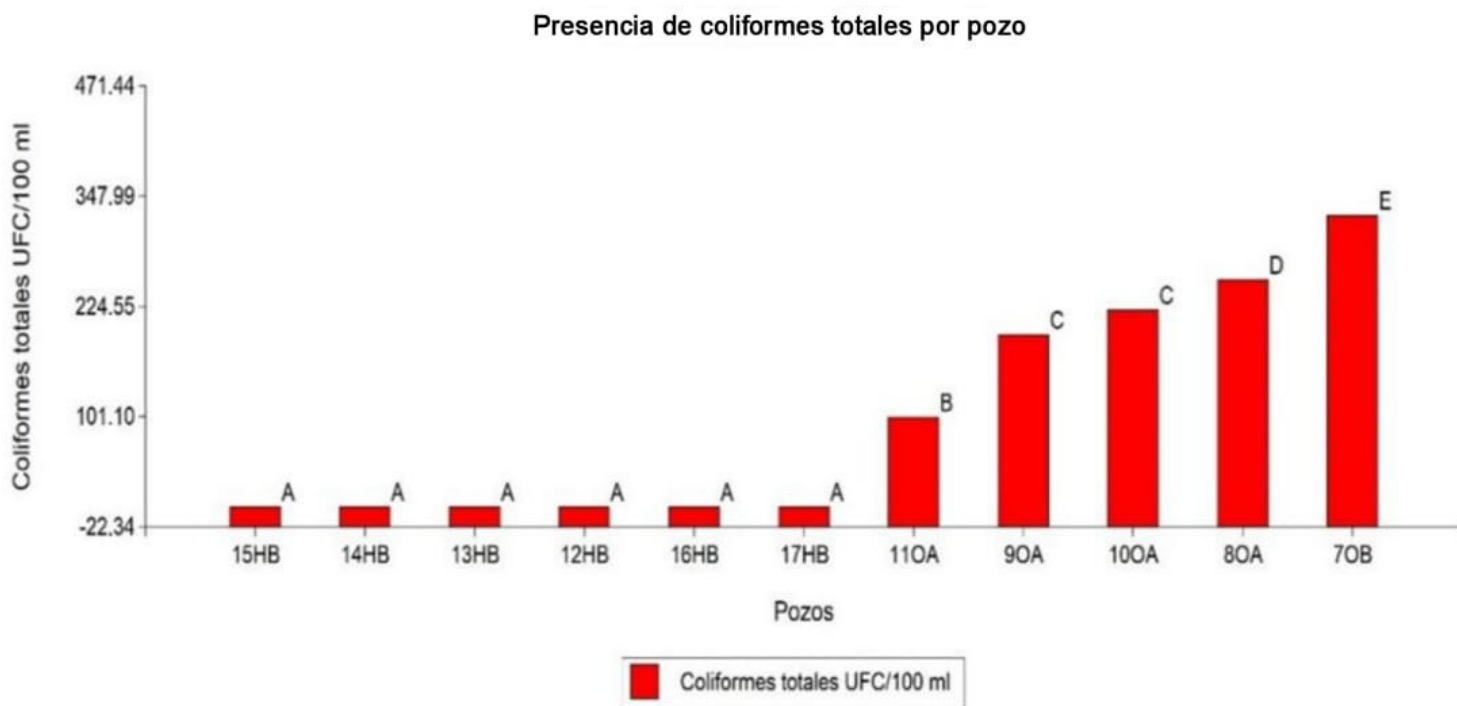


Figura 4. Presencia de coliformes totales en aguas de pozos distribuidos en el área de estudio. Medias que no comparten una letra (A, B, C, D o E) son significativamente diferentes.

Los resultados indican que los pozos ubicados sobre la formación geológica Misiones (arenisca) son más susceptibles a la contaminación por coliformes totales. La infiltración más rápida en la arenisca hace que los pozos sean más vulnerables. Los pozos ubicados sobre el basalto tienen menor presencia de coliformes totales debido a la estructura menos porosa de esta formación geológica (Figura 5).

Coliformes totales y formación geológica

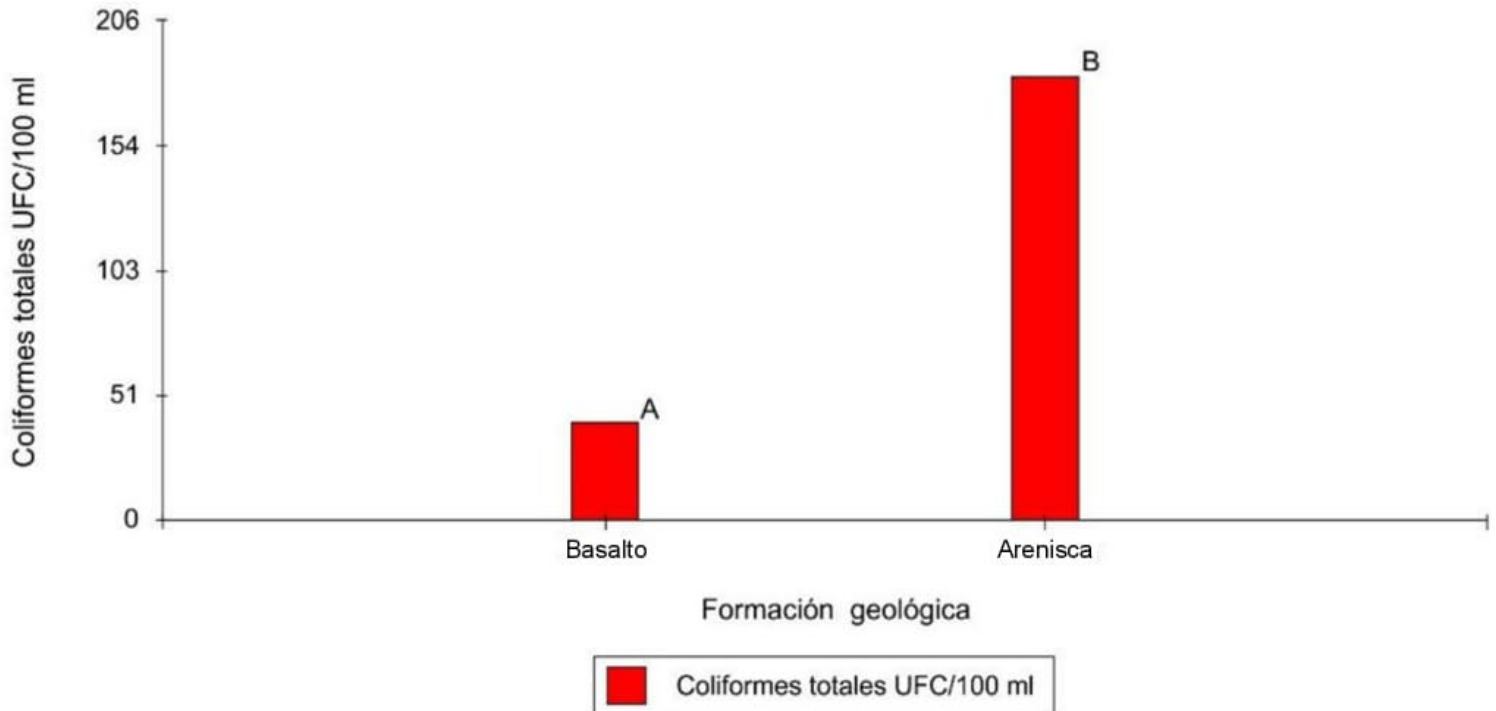


Figura 5. Presencia de coliformes totales en aguas de pozos distribuidos en el área de estudio atendiendo formación geológica. Medias que no comparten una letra (A y B) son significativamente diferentes.

La mayor presencia de coliformes totales está directamente relacionada con la formación geológica; la formación Misiones (areniscas) es la más afectada. Por otro lado, no se encontró relación de la presencia de estos coliformes con la precipitación.

Parámetros físico-químicos

Los resultados de los análisis físico-químicos indican que todos los valores se mantuvieron dentro de los límites establecidos tanto por la normativa nacional (Ley N° 1614/2000) (Erssan, 2000) como por la norma de calidad de agua de la OMS (2011). Los rangos admisibles se respetaron de acuerdo con sus límites establecidos: a) para los parámetros físicos, el pH se mantuvo en el rango de 6.5 a 8.5 mg/l; b) en cuanto a los parámetros químicos, los valores de alcalinidad, aluminio, calcio, dureza total, potasio, amonio, cloruro, cobre, hierro, nitrato, sodio y sulfato, se encontraron dentro de los límites establecidos, que son 250, 0.2, 100, 400, 12, 0.50, 250, 2, 0.3, 5, 200 y 250 mg/l, respectivamente.

Eficacia de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias

Parámetro microbiológico

En la planta de tratamiento de Hohenau, los análisis de 2010 indican una disminución de los coliformes totales luego del proceso de depuración; se mantuvo dentro de los rangos establecidos por la norma paraguaya (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de coliformes totales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Hohenau, años 2010 y 2017.

Año	P1	P2	P3	P4	P5	Máximo permisible
2010	-----	> 2 419.6	> 2 419.6	1 203.3		SR
2017 (marzo)	2.4×10^5	930	4 300	93	2 100	SR
2017 (septiembre)	200	20	17	17	200	SR

SR: sin rango; P1: entrada; P2: pileta 1; P3: pileta 2; P4: pileta 3; P5: salida.

Tabla 3. Valores de coliformes fecales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Hohenau, año 2017.

Año	P1	P2	P3	P4	P5	Máximo permisible
2017 (marzo)	2.4×10^5	930	4 300	93	2 100	<4 000
2017 (septiembre)	200	17	17	170	170	<4 000

SR: sin rango; P1: entrada; P2: pileta 1; P3: pileta 2; P4: pileta 3; P5: salida.

Así, los análisis más recientes de 2017 también demuestran una disminución de coliformes (totales y fecales) luego del tratamiento, a excepción de los coliformes totales que en el final del proceso (P5) volvieron a alcanzar los mismos niveles de entrada (P1), como se observa en la Tabla 2 y Tabla 3. Tanto en marzo como en septiembre de 2017 se

resalta que los valores de coliformes (totales y fecales) disminuyen durante el proceso de depuración y vuelven a aumentar a la salida del sistema al final del tratamiento. Por lo tanto, se considera que la PTAR de Hohenau no funciona correctamente. A pesar de este aumento de coliformes, los valores detectados están por debajo del máximo permisible según la Ley N° 1614/2000 (Erssan, 2000).

También en la Tabla 2 y Tabla 3 se observa que la presencia de coliformes (totales y fecales) es considerablemente menor en el muestreo 2 realizado en el mes de septiembre (primavera) comparando con el muestreo 1 realizado en otoño (marzo), correspondiente al año 2017.

En cuanto a la planta de tratamiento de agua de Obligado, se observa que presenta una buena eficacia en su funcionamiento, los parámetros microbiológicos disminuyen en la última pileta (final de proceso) y se encuentran por debajo del límite máximo permisible según la Ley 1614/2000 (Erssan, 2000) (Tabla 3).

Al igual que en la PTAR de Hohenau, en la Tabla 4 también se observa que la presencia de coliformes (totales y fecales) en la PTAR de Obligado es considerablemente menor en septiembre (primavera) comparando con marzo (otoño).

Tabla 4. Valores de coliformes fecales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Obligado.

Año	P1	P5	Límites máximos
2014 (toma 1)	66 000	0	< 4 000
2014 (toma 2)	6 600 000	100	< 4 000
2015	2 640 000	0	< 4 000
2016	440 000	0	< 4 000
2017 (marzo)	1.1×10^6	< 3	< 4 000
2017 (septiembre)	24	14	< 4 000

P1: entrada; P5: salida.

Tabla 5. Valores de coliformes totales (NMP/100 ml) detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Obligado.

Año	P1	P5	Límites máximos
2017 (marzo)	1.1×10^6	< 3	SR
2017 (septiembre)	170	14	SR

P1: entrada; P5: salida.

Parámetros físico-químicos

En la planta de tratamiento Hohenau, los sólidos en suspensión y sólidos sedimentables se encontraron dentro de los rangos establecidos (entre 0 y 2 ml/g) a la salida de la PTAR. Sin embargo, los valores de DQO y DBO₅ superaron el límite máximo permisible según la Ley 1614/2000 (Tabla 6).

El pH siempre se mantuvo dentro de los rangos establecidos por la norma paraguaya (entre 5 y 9).

Tabla 6. Valores de datos físico-químicos detectados en el proceso de depuración de aguas residuales domiciliarias de la planta de tratamiento del distrito de Hohenau.

	Parámetros	Unidades	P1	P2	P3	P4	P5	Máximo permisible
Muestreo 1 (marzo, año 2017)	Sólido en suspensión	mg/l	91	70	47	73	73	80
	Sólidos sedimentables	ml/l	1	0.1	0.1	0.4	0.4	1
	DQO	mg/l O ₂	239	168	146	172	172	< 150
	DBO ₅	mg/l O ₂	148	108	91	103	103	< 50
	pH	pH	8.4	7	8.6	8.5	9	5-9
Muestreo 2 (septiembre, año 2017)	Sólido en suspensión	mg/l	75	55.4	47	47	44	80
	Sólidos sedimentables	ml/l	2	0.5	0	0	0	1
	DQO	mg/l O ₂	405.6	291.7	220.6	220.6	217.04	< 150
	DBO ₅	mg/l O ₂	240	190	76	76	62	< 50
	pH	pH	7.78	6.99	7.82	7.24	7.8	5-9

P1: entrada; P2: pileta 1; P3: pileta 2; P4: pileta 3; P5: salida.

Con respecto a los parámetros físicos, el proceso de depuración de la PTAR de Obligado no responde correctamente al tratamiento. Los valores del pH en dos ocasiones se encontraron en el rango superior del

límite máximo permisible (valor 9), remarcado en la tabla, entre los años 2014 y 2016 (Tabla 7), y superando en una ocasión el máximo permisible en las normas en el muestreo realizado en 2017 (Tabla 7). Sobre los parámetros químicos, solo los sólidos en suspensión se encontraron por debajo del límite máximo permisible según la Ley 1614/2000; mientras que los sólidos sedimentables, la DQO y la DBO₅ presentan valores que superan los máximos permisibles (Tabla 7). Por lo tanto, se evidencia que la PTAR no es eficiente en el proceso de depuración de estos parámetros.

Tabla 7. Valores de datos físico-químicos detectados en el proceso de depuración de aguas residuales de la planta de tratamiento del distrito de Obligado, base de datos del proveedor del servicio de 2014 a 2016.

Muestreos	Puntos/Piletas	Parámetro				
		pH	Sólido en suspensión (mg/l)	Sólidos sedimentables (mg/l)	DQO (mg/l O ₂)	DBO ₅ (mg/l O ₂)
Muestreo (2010)	P1	7.8	-----	-----	-----	-----
	P2	7.8	-----	-----	-----	-----
	P3	7.7	-----	-----	-----	-----
	Máximo permisible	5-9	-----	-----	-----	-----
Muestreo (2014-2016)	P1 (2014)	6	39.6	-----	114	265
	P5 (2014)	5	24.6	-----	74	34.5
	P1 (2014)	6	184.8	5	371.2	175.5
	P5 (2014)	9	46.2	0.2	128	39.5
	P1 (2015)	7	70.4	3	210.5	159
	P5 (2015)	8	34.8	0.8	105	63
	P5 (2015)	6	42.4	0.1	100.8	49.2
	P1 (2016)	6	15.5	1	95.9	46.8
	P5 (2016)	9	28.4	0.1	133.9	60
	P5 (2016)	6	8.4	0.1	39.9	6.6
	Máximo permisible	5-9	80	1	< 150	50

Muestreos	Puntos/Piletas	Parámetro				
		pH	Sólido en suspensión (mg/l)	Sólidos sedimentables (mg/l)	DQO (mg/l O ₂)	DBO ₅ (mg/l O ₂)
Muestreo 1 (marzo, 2017)	P1	6.9	57	2	224	190
	P3	10	63	0.4	112	66
	P3	10.6	61	0.1	36	22
	P4	9.4	35	0.1	29	20.3
	Máximo permisible	5-9	80	1	< 150	50
Muestreo 2 (septiembre, 2017)	P1	6.9	57	2	224	190
	P2	7.73	39	0,2	259.7	24
	P3	7.78	23	0,1	195.69	20
	P4	7.6	19	0	174.3	8
	Máximo permisible	5-9	80	1	< 150	50

P1: entrada; P5: salida.

Metales pesados en lodos

Los valores de los metales pesados detectados no sobrepasaron los límites establecidos en las tres normas internacionales consideradas en este estudio (Tabla 8).

Tabla 8. Concentración de metales pesados detectados en lodos de las plantas de tratamiento de efluentes domiciliarios de Hohenau y Obligado, y límites permisibles según las normas mexicana, estadounidense y de la Comunidad Europea.

Metales mg/kg	M1 mg/kg	M2 mg/kg	NOM-004- Semarnat-2002		USEPA 503		Comunidad Europea	
			Excelente mg/kg	Bueno mg/kg	LG mg/kg	CE mg/kg	pH<7	pH>7
Cr total	79	38.5	1 200	3 000	3 000	1 200	1 000	1 500
Cd	< 2	< 2	39	85	85	39	20	40
Pb	70.7	28.2	300	840	840	300	750	1 200
Hg	0.08	0.05	17	57	57	17	16	25

M1 = muestra planta de tratamiento de efluentes domiciliarios de Hohenau

M2 = muestra planta de tratamiento de efluentes domiciliarios de Obligado

Cr total = cromo total

Cd = cadmio

Pb = plomo

Hg = mercurio

LG = límite general

CE = calidad excelente

Se detectó la presencia de trazas de Cr total, Pb y Hg. Si bien las concentraciones encontradas no sobrepasan los límites de rangos permisibles en las normas internacionales NOM-004-SEMARNAT-2002 (Mexicana), USEPA 503 (Estados Unidos) y CEC (norma de la Comunidad

Europea), se desconoce el origen de la detección de estas trazas. No se detectó presencia de Cd según los métodos aplicados, siendo su límite de cuantificación 2.0 mg/kg y límite de detección 1.0 mg/kg.

Discusión

En este estudio se evidencia la contaminación del agua subterránea por coliformes totales en áreas de recarga del acuífero Guaraní, al igual que en otros estudios realizados en Itapúa (Houben *et al.*, 2012). y Cordillera (Sotomayor, Villagra, Cristaldo, Silva, & Ibáñez, 2013). Entre las causas más comunes de la contaminación bacteriana del agua subterránea se pueden citar la construcción inadecuada de los pozos; el mantenimiento deficiente de los mismos; y la vulnerabilidad a la contaminación intrínseca de un acuífero, como la profundidad del nivel freático, la geología, etcétera (Rodríguez, Gauna, Martínez, Acevedo, & Romero, 2012). De acuerdo con Larroza, Fariña, Baez y Cabral (2005), la construcción inadecuada de los pozos también se debe al sello sanitario deficiente o a la falta de tapa en los pozos cavados.

La mayor presencia de coliformes en las aguas subterráneas contenidas en la formación Misiones en comparación con la formación Alto Paraná podría explicarse por la porosidad y textura del material geológico. Los acuíferos de la formación Misiones están constituidos por materiales no consolidados o aluviales, por lo tanto existe una mayor dispersión de la corriente subterránea en el material poroso y mayor susceptibilidad a la contaminación. Otros estudios también indicaron que el área donde subaflora la arenisca Misiones es altamente susceptible a la contaminación de las aguas subterráneas en comparación con los

afloramientos de basalto de la formación Alto Paraná (Veroslavsky & Manganelli, 2018; Musálem, McDonald, Jiménez, & Laino, 2015; Eisenkölbl, 2013; SAG-PY, 2009; PSAG, 2009). Sin embargo, Fariña, Vassolo, Cabral, Vera y Jara (2004) advierten que la formación Alto Paraná igualmente tiene una alta vulnerabilidad puntual a la contaminación en las fracturas de la matriz rocosa (Arizabalo & Godínez, 1991). Por otra parte, en PAS-PY (2012) se indica que una forma directa de contaminación de las aguas subterráneas se da a través de los pozos sépticos (pozos ciegos) en zonas urbanas o letrinas en zonas rurales, así el agua residual es vertida directamente al agua subterránea, omitiendo la capacidad de purificación del suelo. Cabe mencionar que las bacterias fecales tienen un tiempo de supervivencia máximo de aproximadamente 50 días fuera del cuerpo humano, por lo que las fuentes de contaminación tienen que estar en las cercanías de los pozos.

En cuanto a los parámetros físicos-químicos, los resultados indican que los mismos se encuentran por debajo de los rangos permisibles según la OMS (2011) a nivel internacional y a nivel nacional según la Ley núm. 1614/2000 (Erssan, 2000). Estos resultados también coinciden con otros estudios nacionales (Houben *et al.*, 2012). e internacionales (Papa, Castellarin, & Sánchez, 2017; Rodríguez *et al.*, 2012; Pacheco-Ávila, Cabrera-Sansores, & Pérez-Ceballos, 2004).

En ambas (PTAR) se constató un proceso inadecuado de depuración según los análisis de laboratorio. También a la salida de estos sistemas se pudo percibir una disminución en el olor y color de las aguas tratadas, lo que confirma estos resultados a nivel cualitativo según Arroba y Ávila (2015), y Morillo Y Fajardo (2005). Con respecto a los parámetros químicos, a pesar de que los valores disminuyeron luego del tratamiento,

la reducción no es suficiente para verter el efluente al cauce hídrico receptor según las normas. Esta situación podría deberse a ineficiencias en la operación de las PTAR, al mal diseño de las mismas y/o a la falta de monitoreos permanentes (Mercado-Guzmán, Cossío-Grágeda & Copa-Mitma, 2020; Mahlknecht, 2013). En el ámbito internacional, en otros países reportan que la principal causa de contaminación en ríos se debe al vertido de afluentes cloacales sin tratar, a la falta de redes recolectoras y/o fugas en las redes ya existentes (Hirata *et al.*, 2019; Zimmermann, 2013).

A pesar de que los resultados de este estudio no son alarmantes en relación con las trazas de metales pesados detectadas en los lodos de ambas PTAR porque no sobrepasan los límites permisibles (OMS, 2011), la presencia de algunos metales llama la atención debido a que se desconoce su origen y pueden ser vertidos a los recursos hídricos receptores durante el proceso.

Conclusiones

El agua subterránea de los pozos que abastecen a la población de los centros urbanos de Obligado y Hohenau está contaminada por coliformes totales. Dicha contaminación afecta la calidad del agua del acuífero Guaraní y se relaciona directamente con la formación geológica, por lo que es más susceptible a contaminarse la formación Misiones (areniscas).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales instaladas en ambas ciudades tienen un sistema deficiente de depuración de parámetros microbiológicos y físico-químicos. Se detectó presencia de Pb, Cr total y Hg en los lodos de ambas plantas de tratamiento, sin embargo las

concentraciones no sobrepasaron los rangos permisibles en el nivel internacional. A pesar de ello, los resultados resaltan la necesidad de identificar el origen de estos metales, pues al estar presentes en los lodos pueden ser transportados hasta los cauces hídricos y concentrarse en los lechos de los ríos. No se detectó presencia de Cd en los lodos de las plantas de tratamiento.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). A la Universidad Nacional de Itapúa-Escuela de Postgrado. A la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Campus de Itapúa, Facultad de Ciencias Agropecuarias. A los directivos y funcionarios de la Junta de Saneamiento Ambiental de Obligado y a la Junta de Saneamiento de Hohenau.

Referencias

Arizabalo, R., & Godínez, G. (1991). La contaminación del agua subterránea y su transporte en medios porosos. *Cuadernos del Instituto de Geofísica núm. 6*. México, DF, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/316004500_La_contaminacion_del_agua_subterranea_y_su_transporte_en_medios_porosos

- Arroba, C., & Ávila, D. (2015). *Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales de un campus universitario* (proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Civil). Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás. Recuperado de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9408/%C3%81vilaDavid2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CEC, Council of the European Communities. (1986). Directive concerning sludge amendments. *Official Journal*, June 12, L181/6.
- CIC, Council of the European Communities. (2004). Visión de los recursos hídricos en Paraguay. Informe final. Recuperado de <https://www.geologiadelparaguay.com.py/Vision-de-los-Recursos-Hidricos-en-Paraguay.pdf>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2017). *InfoStat versión 2017*. Recuperado de <http://www.inf.com.ar>
- Eisenkölbl, A. (2013). *Delimitación de perímetros de protección para pozos artesianos en suelos de formación Misiones. Trinidad. Itapúa*. (tesis de maestría), Universidad Nacional de Itapúa, Postgrado, Encarnación. Recuperado de https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/Beca15-25_Alicia_Einsenkobl.pdf

- Erssan, Ente Regulador de Servicios Sanitarios. (2000). *Tarifario del servicio de agua potable y alcantarillado sanitario Ley N ° 1 .614 / 2000 Reglamento de Calidad en la Prestación del Servicio Permisarios*. Recuperado de <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/1694/ley-n-1614-general-del-marco-regulatorio-y-tarifario-del-servicio-publico-de-provision-de-agua-potable-y-alcantarillado-sanitario-para-la-republica-del-paraguay>
- Fariña, S., Vassolo, S., Cabral, N., Vera, S., & Jara, S. (2004). *Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica del sistema acuífero guaraní (sag) en la Región Oriental del Paraguay al sur de la latitud 25° 30'.* XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Recuperado de https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=pLyzqZoAAAAJ&citation_for_view=pLyzqZoAAAAJ:2osOgNQ5qMEC
- García, B., & Faggioli, A. (2018). Problemática acuífera en el contexto sudamericano del siglo XXI. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 1(3), 103-110. Recuperado de <https://remca.umet.edu.ec/index.php/REMCA/article/view/60>
- Gorostiaga, O., González E., De Llamas, P., Molinas, A., Franco, E., García, S., & Ríos, E. (1995). *Geología del Paraguay. Estudio de reconocimiento de suelos, capacidad de uso de la tierra y propuesta de la Región Oriental del Paraguay (PRUT). Proyecto de racionalización del uso de la tierra (Préstamo nro. 3445-pa)*. Recuperado de <http://www.geologiadelparaguay.com/Estudio-de-Reconocimiento-de-Suelos-Regi%C3%B3n-Oriental-Paraguay.pdf>

- Hirata, R., Vieira, A., Susko, S., Villar, P., & Marcellini, L. (2019). *Trata Brasil*. Recuperado de http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/aguas-subterraneas-e-saneamento-basico/Estudo_aguas_subterraneas_FINAL.pdf
- Houben, G., Eisenkölbl, A., Vera, S., Olavarrieta, A., Dose, E., Rojas, C., Martínez, R., Medina Netto, A., Larroza, F., & Silvero, J. (2012). *Investigación de la calidad del agua: Cuenca Hídrica del Arroyo Capiibary, Departamento de Itapúa*. Recuperado de <https://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2018/06/Informe-Final-Capiibary.pdf>
- INTN, Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología. (2001). Norma Paraguaya NP 24 001 80 agua potable especificaciones (5ª ed.). Asunción, Paraguay: Organismo Nacional de Certificación y Normalización del Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología.
- Larroza, F., Fariña, S., Baez, J., & Cabral, N. (2005). *Evaluación hidrogeológica y protección a la contaminación del agua subterránea en la Reserva de la Biosfera del Bosque Mbaracayu (RBBMb)*. Recuperado de <http://www.geologiadelparaguay.com.py/Evaluaci%C3%B3n-Hidrogeol%C3%B3gica-Reserva-Mbaracay%C3%BA.pdf>
- Mahlknecht, J. (marzo, 2013). *Centro del Agua para América Latina y el Caribe*. Recuperado de <https://www.academia.edu/RegisterToDownload/UserTaggingSurvey>

Mercado-Guzmán, Á., Cossío-Grágeda, C., & Copa-Mitma, M. (marzo, 2020). Eficiencia vinculada a la operación y mantenimiento de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova*, 9(4), 524-542. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/352731694_Eficiencia_vinculada_a_la_operacion_y_mantenimiento_de_pequenas_plantas_de_tratamiento_de_aguas_residuales_domesticas_en_Cochabamba_Bolivia

MOPC, Ministerio de Obras Públicas y Comunicación. (2018). *Plan nacional de agua potable y saneamiento*. Recuperado de <https://siaparaguay.ine.gov.py/data/archivos/3.%20Plan%20Nacional%20de%20Agua%20Potable%20y%20Saneamiento.pdf>

Morillo, F., & Fajardo, E. (2005). *Universidad Nacional de Colombia. Estudio de los reactores UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda*. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/3471/fernandacristinamorilloleon.2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Musálem, K., McDonald, M., Jiménez, F., & Laino, R. (2015). Groundwater vulnerability mapping in two watersheds affected by Yacyreta Dam in Paraguay. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(6), 49-61. Recuperado de <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1160>

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. Recuperado de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf

- Pacheco-Ávila, J., Cabrera-Sansores, A., & Pérez-Ceballos, R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el estado de Yucatán, México. *Ingeniería Revista Académica*, 8(2), 165-179. Recuperado de <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen8/diagnostico.pdf>
- Papa, J., Castellarin, J., & Sánchez, J. (2017). *La calidad del agua subterránea en el distrito Monje (departamento San Jerónimo) Santa Fe*. Recuperado de https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/1925/INTA_CRSantaFe_EEAOliveros_Papa_JC_La_calidad_del_agua_subterr%c3%a1nea_en_el_distrito_Monje.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- PSAG. (2009). *Avances en el conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní: Tomo 1 - Geología y Geofísica, P&T Consultora SRL, Volumen 1*. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.
- Rodríguez, S., Gauna, L., Martínez, G., Acevedo, H., & Romero, C. (2012). Relación del nitrato sobre la contaminación bacteriana del agua. *Terra Latinoamericana*, 30, 111-119. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000200111

- SAG-PY. (2009). *Proyecto para la protección ambiental y desarrollo sostenible del sistema acuífero Guaraní. Informe Técnico*. Recuperado de https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/TZ/Guarani/sag-py_vol1_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Semarnat, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana (NOM004-SEMARNAT-2002). Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=736434&fecha=18/02/2002
- Sotomayor, F., Villagra, V., Cristaldo, G., Silva, L., & Ibáñez, L. (2013). Determinación de la calidad microbiológica de las aguas de pozo artesiano de distritos de los departamentos Central, Cordillera y municipio Capital. *Memorias del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Salud*, 11(1), 5-14. Recuperado de <http://archivo.bc.una.py/index.php/RIIC/article/view/111>
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (1995). *Standard for the use and disposal of sewage sludge; 40 CFR Parts 403 and 503*. Recuperado de https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/a_plain_english_guide_to_the_epa_part_503_biosolids_rule.pdf

- Veroslavsky, G., & Manganelli, A. (2018). Zonificación del sistema acuífero Guaraní en Uruguay: una guía orientativa para su gestión y protección ambiental. *Aqua-LAC*, 10(2), 61-80. DOI: 10.29104/phi-2018-aqualac-v10-n2/06
- Zarrilli, Á. (2018). Cuenca del Plata: ríos, planicies y sociedades en el Cono Sur. *Revista de Historia Regional*, 23(1), 7-36. DOI: 10.5212/Rev.Hist.Reg.v.23i1.0001
- Zimmermann, S. (2013). *Situación del agua en América Latina*. Conferencia sobre agua en Ottawa, capítulo Argentino, Club de Roma, Canadá.