

CORRELACION ENTRE INDICADORES DE CALIDAD AGRONÓMICA DEL AGUA RESIDUAL DEPURADA DE LA CAPITAL DE CATAMARCA

M. Saracho¹, P. Jalabert, M. Flores, N. Carrizo

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO. – CONICET

Universidad Nacional de Catamarca, Avda. Belgrano 300 C.P. 4700 – Catamarca

E-mail: martasaracho@gmail.com

Recibido 17/08/14, aceptado 28/09/14

RESUMEN: Actualmente se utilizan de manera ineficiente grandes cantidades de agua y la demanda crece más rápido de lo que la naturaleza puede abastecer, en particular para uso agrícola. Esta problemática podría ser atenuada reutilizando aguas residuales tratadas. Se plantea como objetivos determinar la calidad del efluente depurado por lagunas de estabilización de la Capital de Catamarca en base a indicadores de calidad agronómica, tipo de sales predominantes y correlacionar dichos indicadores para simplificar su caracterización. Se analizaron muestras compensadas del efluente y la calidad química para riego fue evaluada utilizando indicadores de peligrosidad salina y peligrosidad sódica. Se efectuó análisis estadístico correlacional entre los indicadores utilizados. La calidad química del efluente depurado para riego puede ser clasificada de baja peligrosidad sódica y moderada salinidad, según los criterios aplicados, pudiendo utilizarse en suelos de moderada a buena permeabilidad, siendo la RAS y CE los indicadores más importantes para simplificar su caracterización.

Palabras clave: indicadores de calidad agronómica, reuso agua residual, riego, lagunas de estabilización,

INTRODUCCION

En la actualidad se gastan y utilizan de manera ineficiente grandes cantidades de agua y a menudo la demanda está creciendo mucho más rápido de lo que la naturaleza nos puede abastecer. Se prevé que el cambio climático mundial intensificará las tensiones actuales y futuras sobre los recursos hídricos, repercutiendo en su disponibilidad al modificarse las precipitaciones, humedad del suelo, derretimiento de los glaciales y flujos de agua superficial y subterránea. Por lo cual, una solución a la crisis mundial del agua reside en nuestra capacidad de gestionar mejor la demanda y encontrar la forma de equilibrar y obtener el máximo beneficio del agua (UNESCO, 2012).

En las regiones áridas y semiáridas del mundo la disponibilidad insuficiente de agua es uno de los factores limitantes del rendimiento de los cultivos y crecimiento económico. La agricultura es el principal sector consumidor de recursos hídricos, aproximadamente el 75% a 80 % del consumo mundial del agua (Pozzi, 2004) alcanzando en algunos países el 90% del total del agua disponible (FAO, 2003). Además en las últimas dos décadas se observa una tendencia de aumento de la superficie bajo riego, hecho que está ligado al aumento poblacional y la necesidad de su alimentación. Frente a esta demanda creciente de agua para fines agrícolas se ha impuesto la utilización de fuentes de agua de muy diversa procedencia, no solamente de aguas superficiales y subterráneas, sino también la reutilización de aguas residuales tratadas. Este agua es un recurso estratégico que permite garantizar las producciones previstas, independizarse de las fuentes de suministro convencionales y de las condiciones climáticas (se trata de una fuente de agua siempre disponible) (Boman et al, 2002).

Sin embargo, la utilización de efluentes para riego requiere tratamientos y controles adecuados que aseguren la ausencia de riesgos para la salud humana y animal, eviten la contaminación de aguas superficiales y napas freáticas durante su manipulación, almacenamiento y uso (Silva et al, 2008). La mayoría de los estándares actuales para la reutilización de aguas residuales hace referencia solo a aspectos sanitarios estableciendo restricciones de uso para cierta categoría de cultivos en base a bacterias, virus y parásitos (Ayres y Mara, 1997; WHO, 2006); sin embargo también se debe tener en cuenta aspectos agronómicos relacionados con la calidad química del efluente depurado que determina el tipo de cultivo y de suelo donde puede ser aprovechado. En este sentido el mejor criterio disponible para determinar la aptitud del efluente para su reuso son los estándares de calidad establecidos para el riego de cultivos con agua natural (Libhaber, 2007).

La calidad del agua usada para irrigación es determinante para la producción en la agricultura, mantenimiento de la productividad del suelo de manera sostenible y protección del medio ambiente. Así las propiedades físico - químicas del suelo (estructura del suelo, estabilidad de los agregados) y permeabilidad son características muy susceptibles al tipo de iones intercambiables que provengan del agua de riego (Avellaneda et al, 2004).

Desde el punto de vista agrícola, la calidad del agua se refiere al tipo y cantidad de sales presentes en ella, a su efecto sobre el suelo y al desarrollo y crecimiento de los cultivos. Las características más importantes que determinan la calidad de agua para este uso son la concentración total de sales solubles, la concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes, la concentración de boro u otros elementos que pueden ser tóxicos y bajo ciertas condiciones la concentración de bicarbonato con relación a la de calcio más magnesio (Cortez et al., 2009).

¹ Profesional Secretaría de Recursos Hídricos. Gob. Provincia de Catamarca

Las sales disueltas en el agua son transportadas y depositadas en los suelos donde se acumulan en los distintos horizontes y a corto, mediano o largo plazo actuarán en contra de los cultivos no tolerantes a la salinidad. Los constituyentes salinos son principalmente cationes de Ca^{+2} , Mg^{+2} , y Na^+ y en menor proporción el K^+ ; entre los aniones más frecuentes se encuentran Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- y en menor proporción NO_3^- y F^- . Según el comportamiento de las sales y su efecto sobre los cultivos se las agrupa en dos categorías; las sales poco solubles, de bajo producto de solubilidad que precipitan a concentraciones inferiores a las que pueden producir daños en las plantas (CaCO_3 , MgCO_3 y CaSO_4) y las sales muy solubles que son perjudiciales (NaCl ; MgCl_2 ; Na_2SO_4 ; MgSO_4 ; Na_2CO_3 y NaHCO_3) (Pérez, 2011)

Aguas con alto contenido de calcio y magnesio se consideran duras y no son recomendables para uso doméstico, sin embargo este tipo de agua se considera buena para irrigación. De los cationes encontrados en el agua, el sodio es el más peligroso. A diferencia de las aguas cálcicas o magnésicas, aquellas con alta concentración de sodio son consideradas blandas y generalmente no son recomendables para irrigación (Grillo, 2005).

El riego con aguas de elevada salinidad afecta su disponibilidad para el cultivo debido a que la progresiva concentración de sales solubles origina un potencial osmótico muy desfavorable en la solución del suelo, que las raíces de las plantas deben superar para extraer el agua. De este modo se afecta el desarrollo vegetativo de las plantas por déficit hídrico y dependiendo de la sensibilidad de la especie se producen reducciones apreciables del rendimiento (Avellaneda et al., 2004). Las aguas residuales depuradas tienen una determinada concentración de sales en solución que dependen del contenido salino inicial del agua de abastecimiento público y del incremento que experimentan como consecuencia de la naturaleza e intensidad de los procesos de utilización urbana (Pozzi, 2004).

Otro problema relacionado con la calidad química del agua de riego que es necesario evaluar es la sodificación del suelo, que afecta su estructura. Cuando el sodio se encuentra presente en alta concentración en el agua de riego, el calcio y el magnesio precipitan en la solución del suelo por la acción de carbonatos y bicarbonatos. El sodio sustituye al calcio y magnesio del complejo arcillo-húmico originando un desequilibrio eléctrico de las partículas coloidales del suelo. Debido al predominio de cargas negativas, las partículas del suelo se repelen originando defloculación y pérdida de la estructura del suelo: hay menos entrada de oxígeno y disminución de la permeabilidad que afecta el desarrollo de los cultivos (Porta, 2010). La concentración adecuada de estos aniones depende del tipo de cultivo, el estado de crecimiento, concentración de los iones tóxicos y combinación de los mismos, clima y condiciones particulares del tipo de suelo y su manejo (Avellaneda et al, 2004).

El ion sulfato no provoca en general daños en las plantas, sin embargo, contribuye al incremento de la salinidad del suelo. En contraste, el cloruro y boro en ciertas concentraciones tienen efecto tóxico sobre algunas plantas (Cortez et al, 2009). El cloruro es captado por las plantas y se acumula en hojas. Si su concentración excede la tolerancia del cultivo, los síntomas de daño se manifiestan como quemaduras en puntas y bordes de las hojas (Sancha et al, 2005).

El boro es esencial para el crecimiento de las plantas, pero si está presente en cantidades mayores que las requeridas se transforma en tóxico. Su característica es el angosto rango de concentraciones aceptables en agua de riego que resulta óptimo para no desequilibrar el crecimiento de las plantas. Es necesaria una mínima concentración en el agua de irrigación para sostener algunas actividades metabólicas básicas en las plantas, pero en concentraciones mayores a 3 mg/l puede producir según el tipo de especie vegetal puntos amarillos en hojas y frutos, marchitamiento acelerado y en última instancia la desaparición física de la planta. El boro detectado en los efluentes domésticos tienen como origen el uso de agentes blanqueantes como el perborato (Pozzi, 2004).

La ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca, Capital de la provincia, cuenta con una planta de tratamiento de líquidos cloacales constituida por un sistema de lagunas de estabilización, cuyo efluente es descargado en el cauce del río Santa Cruz sin ningún reuso, a pesar de la alta demanda de agua para riego productivo. Si bien se cuenta con investigaciones sobre el funcionamiento de las lagunas, tecnología de tratamiento recomendada para el reuso del efluente (Lorenzo et al, 2008), el caudal tratado actualmente (56.000 m³/d) excede el caudal de diseño (38.400 m³/d) por lo que se considera conveniente conocer la calidad química del efluente obtenido bajo las mencionadas condiciones de operación. Cabe aclarar que en el periodo enero 2010 a julio 2014, el incremento de conexiones a la red cloacal, atendiendo a la demanda poblacional fue de 6.586 usuarios, lo que representan el 12,5% del total de conexiones (Aguas de Catamarca SAPEN, 2014).

Estudios anteriores sobre la calidad bacteriológica y parasitológica del efluente depurado por el citado sistema de lagunas (Saracho et al, 2010) reportan la aptitud del líquido depurado para riego de cultivos categoría B (cereales industriales y forrajeros, praderas y árboles); registrándose actualmente un tiempo de retención hidráulico de 19 días, permanencia que supera lo recomendado por las directrices sanitarias de la OMS para el citado reuso (1989).

Ante la situación planteada, se considera que una gestión sustentable que contemple el reuso controlado del efluente depurado de la ciudad Capital, no solo permitirá mitigar los impactos negativos sobre el recurso hídrico, sino atender a los requerimientos productivos de la zona destinando los recursos hídricos naturales de mejor calidad a usos más exigentes como es el abastecimiento de agua potable.

Para determinar la aptitud del agua natural para fines agrícolas existen numerosas metodologías, algunas de las cuales son muy complejas. Este trabajo se plantea como objetivos determinar la calidad actual del agua residual depurada por el sistema de lagunas de estabilización en la Capital de Catamarca en base a indicadores de calidad agronómica, el tipo de sales predominantes y correlacionar los indicadores encontrados con el propósito de simplificar su caracterización. Se considera que de este modo será posible realizar un monitoreo sistemático de la calidad de este recurso y recomendar su reuso sustentable.

MATERIALES Y METODOS

La ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca, con una población de 160.058 habitantes (INDEC, 2010), trata los efluentes cloacales en una planta de depuración constituida por un sistema de lagunas de estabilización, ubicada al sur-este de la capital provincial, entre los ríos Del Valle y Santa Cruz (Figura 1). Un caudal de 52.000 m³/d de efluentes son depurados en seis módulos iguales, integrados cada uno por una laguna anaeróbica, una facultativa y tres de maduración (Figura 2) que funcionan en paralelo.



Figura 1. Imagen satelital de la ubicación de la Planta de efluentes cloacales de la ciudad Capital de Catamarca.



Figura 2. Lagunas de estabilización de la Ciudad Capital. Lagunas de Maduración. Módulo 3.

Para evaluar la calidad química para riego del agua residual depurada se utilizaron como indicadores de peligrosidad salina, la conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), salinidad potencial (SP) y salinidad efectiva (SE). Estos últimos fueron calculados en función de las ecuaciones (1) y (2). La aplicación de la ecuación (2) propuesta por Palacios y Aceves (Pérez, 2011) se hizo teniendo en cuenta que en el líquido estudiado se cumple la siguiente relación: $(Ca^{+2} + Mg^{+2}) < (CO_3^{-2} + HCO_3^{-})$.

$$SP = Cl^{-} + SO_4^{-2} \quad (1)$$

$$SE = \sum cationes - (Ca^{+2} + Mg^{+2}) \quad (2)$$

Los indicadores relación de absorción de sodio (RAS), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y carbonato de sodio residual fueron utilizados para valorar la variable peligrosidad sódica y calculados a través de las ecuaciones 3, 4 y 5.

$$RAS = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}} \quad (3)$$

$$PSI = \left[\frac{-0,0126 + 0,01475 \times RAS}{1 + (-0,0126 + 0,01475 \times RAS)} \right] \times 100 \quad (4)$$

$$CSR = (CO_3^{-2} + HCO_3^{-}) - (Ca^{+2} + Mg^{+2}) \quad (5)$$

La aptitud del agua residual para riego agrícola desde el punto de vista químico fue evaluada aplicando las clasificaciones propuestas por Riverside modificada por Thorne y Peterson (Avellaneda et al. 2004), Scofield (Sancha et al. 2005), Palacio y Aceves (1970), Marín et al (2002) y las Guías para la Calidad del Agua para la Agricultura de la FAO (Ayers y Westcot, 1985).

Muestreo

Se extrajeron muestras compensadas manualmente, durante 24 hs del líquido efluente de las lagunas de estabilización de la ciudad Capital en el sitio de descarga al río Santa Cruz. Teniendo en cuenta las variaciones de caudal del efluente se extrajeron muestras puntuales, de volumen variable cada 6 hs las que fueron mezcladas y conservada a 4°C hasta su análisis. El muestreo fue realizado por integrantes del grupo de investigación en colaboración con personal de la empresa Aguas de Catamarca, en el periodo 2012- 2014, con una frecuencia quincenal durante un año y mensual durante nueve meses.

Técnicas de análisis

Se determinó la conductividad eléctrica, concentraciones de sólidos solubles totales, iones indicadores de calidad química: calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruro, sulfato, boro, carbonato y bicarbonato de acuerdo a las técnica descrita en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF.2005).

Se efectuó un análisis estadístico descriptivo de las concentraciones de los iones analizados. A los efectos de simplificar la determinación de la calidad agronómica para riego se correlacionó los indicadores de peligrosidad sódica y salina. También se realizó análisis estadístico correlacional de las concentraciones de los iones analizados, CE y STD, determinando las sales presentes en el agua en función de los valores de significación y el grado de correlación entre dichas variables. Se utilizó el software SPSS 10.0 para Windows.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la tabla 1 se muestran los valores de posición de las concentraciones de los aniones y cationes detectadas en el efluente depurado.

	Na ⁺ (meq/l)	K ⁺ (meq/l)	Ca ⁺² (meq/l)	Mg ⁺² (meq/l)	HCO ₃ ⁻ (meq/l)	CO ₃ ⁻² (meq/l)	Cl ⁻ (meq/l)	SO ₄ ⁻² (meq/l)	B ⁺³ (mg/l)
X _{prom}	7	0,29	2,8	1,0	6,3	ND	1,9	2,2	0,6
X _{med}	8	0,27	2,7	0,9	6,3	ND	1,8	2,3	0,5
X _{max}	9	0,33	2,8	1,4	6,7	ND	2,0	2,5	0,6
X _{min}	4	0,26	2,5	0,7	5,3	ND	1,5	1,9	0,4
DS	1	0,03	0,4	0,2	0,4	ND	0,1	0,2	0,1

Tabla 1: Indicadores químicos de calidad del efluente depurado

Según las guías para la interpretación de calidad de agua para riego de la FAO (Ayers y Westcot, 1985), la concentración del ión cloruro en el agua estudiada, inferior a 4 meq/l, no presenta ninguna restricción de uso. La concentración media del ión bicarbonato detectada, 6,3 meq/l, al encontrarse en el rango comprendido entre 1,5 meq/l – 8,5 meq/l, origina un grado de restricción de uso leve a moderado de acuerdo a la citada normativa

El ión sulfato contribuye a aumentar la salinidad de la solución del suelo pero no produce efectos específicos en las plantas. Según la tabla 1 el valor medio de este ión en el efluente es de 2,2 meq/l, por lo cual - y según la clasificación de Scofield (Sancha et al. 2005), el agua analizada pertenece a la categoría de muy buena (SO₄²⁻ < 4 meq/l). La concentración media del boro - elemento fitotóxico- detectada en el agua en estudio es de 0,6 mg/l; al ser inferior a 0,7 mg/l no presenta ninguna restricción de uso de acuerdo a los niveles guías de la FAO sobre toxicidad por iones específicos (Ayers y Westcot, 1985).

El principal peligro en un agua de riego está representado por la concentración del sodio; si el contenido de este ión es alto con respecto a la concentración de calcio y magnesio, afecta la permeabilidad del suelo y causa problemas de infiltración. Este efecto fue evaluado en función de la RAS y de la conductividad eléctrica del agua, aplicando la clasificación propuesta por Riverside, modificada por Thorne y Peterson (Avellaneda et. al, 2004) y de la FAO. De acuerdo a los valores medios de dichos indicadores, que se muestran en la tabla 2, el agua en estudio se encuentra dentro de la categoría S1, baja peligrosidad sódica y C3 salinidad mediana y puede ser usada en suelos de moderada a buena permeabilidad. Según la FAO, el grado de restricción de uso es leve a moderado (RAS entre 3 a 6 y conductividad eléctrica entre 1200 µS/cm a 300 µS/cm).

El PSI encontrado 6,1%, valor inferior a 15%, indicador del grado de saturación del complejo de intercambio del suelo con el sodio, no presenta peligro de sodificación y dispersión del suelo (Palacio y Aceves, 1970). El valor medio del otro indicador de peligrosidad sódica calculado, el CSR, que evalúa el peligro de sodicidad de un agua de riego y su acción degradante - 2,5 meq/l – clasifica el agua estudiada como poco recomendable para riego (Avellaneda et. al, 2004).

El valor medio de STD detectado, 420 mg/l, no presenta ningún grado de restricción de uso según las guías de la FAO. Igual caracterización puede realizarse teniendo en cuenta el valor medio calculado de SP que resultó inferior a 3 meq/l- índice que estima el peligro de los iones cloruros y sulfatos, que aumentan la presión osmótica del suelo- (Pérez 2011).

El restante índice de peligrosidad salina calculado, la SE, indicador del peligro que representan las sales solubles del agua para riego al pasar a formar parte de la solución del suelo, señala que el uso de este agua está condicionada ya que su valor se encuentra entre 3 a 15 meq/l. concordando con la clasificación obtenida en base a la CE.

	CE (µS/cm)	STD (mg/l)	SP (meq/l)	SE (meq/l)	RAS(meq/l)	PSI (%)	CSR(meq/l)
X _{prom}	840	420	2,4	7,4	5	6,1	2,5
X _{med}	870	440	2,4	8,0	6	6,6	2,6
X _{max}	900	450	3,2	8,5	6	6,9	3,2
X _{min}	720	360	1,8	3,9	3	2,6	1,1
DS	60	30	0,6	1,1	1	1,0	0,3

Tabla 2: Indicadores de peligrosidad sódica y salina

En tabla 3 se muestran los valores de correlación entre pares iónicos (catión/anión), CE y STD. Se consideraron solamente los valores que resultaron significativos (*) con un nivel de confiabilidad del 5% ó altamente significativos (**) con un nivel de confianza del 1%.

En base a este análisis se identificó los tipos de sales que se encuentran en solución en el efluente depurado para riego. El ión sodio correlacionó positivamente con los aniones HCO₃⁻ y Cl⁻ formando sales de muy alta solubilidad, perjudiciales para los cultivos. Además, entre este tipo de sales está en el agua analizada, en menor proporción, el

MgCl₂, como lo señala la correlación encontrada entre el Mg⁺² y el Cl⁻¹. En el caso del Ca⁺² solamente se encontró significativa la correlación con el ión Cl⁻¹, formando CaCl₂, sal soluble (solubilidad 74,5 g/100 ml).

		HCO3	SO4	Cl	Ca	Mg	Na	K	CE	STD
HCO3	Pearson Correlation	1,000	,468**	-,255	,052	,245	,374*	,080	,284	,291
	Sig. (2-tailed)	,	,006	,153	,775	,169	,032	,656	,109	,100
	N	33	33	33	33	33	33	33	33	33
SO4	Pearson Correlation	,468**	1,000	-,057	-,248	-,265	-,029	,205	,430*	,422*
	Sig. (2-tailed)	,006	,	,753	,164	,136	,875	,252	,012	,014
	N	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Cl	Pearson Correlation	-,255	-,057	1,000	-,382*	-,363*	-,423*	-,322	,078	,063
	Sig. (2-tailed)	,153	,753	,	,028	,038	,014	,068	,665	,728
	N	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Ca	Pearson Correlation	,052	-,248	-,382*	1,000	,737**	,266	,553**	-,133	-,134
	Sig. (2-tailed)	,775	,164	,028	,	,000	,135	,001	,461	,457
	N	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Mg	Pearson Correlation	,245	-,265	-,363*	,737**	1,000	,264	,535**	-,141	-,135
	Sig. (2-tailed)	,169	,136	,038	,000	,	,137	,001	,435	,454
	N	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Na	Pearson Correlation	,374*	-,029	-,423*	,266	,264	1,000	,193	-,301	-,268
	Sig. (2-tailed)	,032	,875	,014	,135	,137	,	,281	,088	,131
	N	33	33	33	33	33	33	33	33	33
K	Pearson Correlation	,080	,205	-,322	,553**	,535**	,193	1,000	,072	,087
	Sig. (2-tailed)	,656	,252	,068	,001	,001	,281	,	,689	,630
	N	33	33	33	33	33	33	33	33	33
CE	Pearson Correlation	,284	,430*	,078	-,133	-,141	-,301	,072	1,000	,998**
	Sig. (2-tailed)	,109	,012	,665	,461	,435	,088	,689	,	,000
	N	33	33	33	33	33	33	33	33	33
STD	Pearson Correlation	,291	,422*	,063	-,134	-,135	-,268	,087	,998**	1,000
	Sig. (2-tailed)	,100	,014	,728	,457	,454	,131	,630	,000	,
	N	33	33	33	33	33	33	33	33	33

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabla 3. Matriz de Correlación entre cationes y aniones presentes en el efluente depurado de las lagunas de estabilización de la ciudad Capital.

Las correlaciones significativas entre la CE, el ión SO₄⁻² y STD permiten estimar dichos valores a partir de la CE. Se encontró además correlaciones significativas entre el Mg⁺² y K⁺¹ con el Ca⁺².

		CE	STD	SP	SE
CE	Pearson Correlation	1,000	,998**	,341	-,287
	Sig. (2-tailed)	,	,000	,052	,105
	N	33	33	33	33
STD	Pearson Correlation	,998**	1,000	,320	-,254
	Sig. (2-tailed)	,000	,	,069	,154
	N	33	33	33	33
SP	Pearson Correlation	,341	,320	1,000	-,405*
	Sig. (2-tailed)	,052	,069	,	,019
	N	33	33	33	33
SE	Pearson Correlation	-,287	-,254	-,405*	1,000
	Sig. (2-tailed)	,105	,154	,019	,
	N	33	33	33	33

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabla 4. Correlación entre los indicadores de peligrosidad salina

La tabla 4 se muestra las correlaciones entre las variables utilizadas para evaluar la peligrosidad salina. Los valores reportados indican que las correlaciones más significativas se producen entre la CE y STD. Con un nivel de significación de 0,05 se observa además correlación entre SP y SE.

Las correlaciones entre los indicadores utilizados para evaluar la peligrosidad sódica se muestran en la tabla 5. Se encontró en este estudio que el PSI del efluente tiene un coeficiente de correlación más alto con la RAS que con el CSR en coincidencia a lo encontrado por Cortés et al (2009).

		RAS	CSR	PSI
RAS	Pearson Correlation	1,000	,347*	,999**
	Sig. (2-tailed)	,	,048	,000
	N	33	33	33
CSR	Pearson Correlation	,347*	1,000	,347*
	Sig. (2-tailed)	,048	,	,048
	N	33	33	33
PSI	Pearson Correlation	,999**	,347*	1,000
	Sig. (2-tailed)	,000	,048	,
	N	33	33	33

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Tabla 5. Correlación entre los indicadores de peligrosidad sódica

En función de este análisis se considera factible estimar algunos de los indicadores analizados y hacer más simple la clasificación y monitoreo del efluente depurado.

Las correlaciones significativas entre las variables STD, SO_4^{-2} y CE permite estimar dichos valores a través de la CE. Lo mismo ocurre con SE y SP. Análogo razonamiento se puede aplicar a las correlaciones entre los indicadores de peligrosidad sódica; PSI y CSR con el RAS. También se puede estimar las concentraciones de los iones Mg^{+2} , K^{+1} conociendo la concentración del Ca^{+2} y del ion SO_4^{-2} a partir de la CE.

Las ecuaciones de regresión entre las variables mencionadas más correlacionadas se pueden observar en la tabla 6.

Variable	Ecuación	R ²	Variable	Ecuación	R ²
STD	5,141 + 0,493 CE	0,996	PSI	-0,874 + 1,326 RAS	0,998
SO_4^{-2}	0,754 + 0,002 CE	0,678	CSR	1,024 + 0,286 RAS	0,761
SE	14,548 - 2,452 SP	0,710	Mg	-0,086 + 0,373 Ca	0,737
			K	0,190 + 0,036 Ca	0,689

Tabla 6: Ecuaciones de regresión entre variables indicadoras de la calidad del efluente depurado.

Teniendo en cuenta que el área de estudio integra la diagonal árida sudamericana caracterizada por predominio de aire seco, altos coeficientes de heliofanía, con una precipitación promedio anual de 350mm, de régimen pluvio-estival (Eller y Vivas, 2013) disponer de un caudal constante de 56.000m³/día del agua residual depurada para riego productivo podría ser un importante aporte para satisfacer la alta demanda de recursos hídricos para diferentes usos.

En función de la calidad bacteriológica del efluente depurado y de los resultados de este estudio se propone destinar el agua residual depurada al cultivo de olivos, que actualmente son irrigados con agua subterránea y de forrajeros como alfalfa, en áreas próxima a la planta donde predominan suelos arenoso con baja concentración en materia orgánica, que sería mejorados con el aporte de nutrientes contenido en el efluente lo que permitiría fertilizar naturalmente el suelo para los cultivos y ampliar la producción agrícola.

CONCLUSIONES

La calidad del efluente depurado por las lagunas de estabilización de la ciudad Capital de Catamarca para riego puede ser clasificada de baja peligrosidad sódica y moderada salinidad, según los criterios aplicados, pudiendo utilizarse en suelos de moderada a buena permeabilidad, pero resultó condicionada para los indicadores CE, CSR y SE. El resto de los indicadores analizados valora la calidad química del efluente como buena y por lo tanto sin restricciones para su uso en riego agrícola.

Las sales disueltas encontradas en el efluente depurado son cloruro de sodio, bicarbonato de sodio, cloruro de calcio y cloruro de magnesio, resultando de mayor peligrosidad para los cultivos las dos primeras, sin embargo, las sales solubles de calcio y magnesio actúan moderando su efecto, lo que se evidencia en el valor del RAS.

Las correlaciones más significativas entre los indicadores de peligrosidad sódica se producen entre la RAS y el PSI.

El PSI del efluente depurado tiene un coeficiente de correlación más alto con la RAS que con el CSR en coincidencia con lo reportado por otros investigadores.

Los indicadores de peligrosidad salina con mejor nivel de correlación son STD con CE.

Los indicadores más importantes para simplificar la caracterización y monitoreo continuo de la calidad química del efluente depurado para riego, en función de este estudio, son la RAS y la CE, teniendo en cuenta que el efecto sobre la producción dependerá además de otros factores tales como tipos de cultivos, propiedades del suelo, manejos del suelo y agua y condiciones climáticas.

NOMENCLATURA

CE: conductividad eléctrica
STD: sólidos totales disueltos
SP: salinidad potencial
SE: salinidad efectiva
RAS: relación de absorción de sodio y carbonato de sodio residual
PSI: porcentaje de sodio intercambiable
CSR: carbonato de sodio residual

REFERENCIAS

- Aguas de Catamarca S.A.P.E.M. (2014). Memoria Anual: Base de Datos. Catamarca.
- APHA.-A.W.W.A.-W.E.F. (2005). Standard Methods for de Examination of Water and Wastewater. Edición 21. pp 5-10; 5-13. United States of America.
- Avellaneda M, Bermejillo A, Mastrantonio L. (2004). Aguas de Riego. Calidad y Evaluación de su Factibilidad de Uso. EDIUNC. Mendoza.
- Ayres R y Mara D. (1997). Análisis de Aguas Residuales para su Uso en Agricultura. 1º edición, pp. 2 – 16. OMS. Ginebra.
- Ayers, R. y Westcot, D. (1985). Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1, Roma, 174 p.
- Boman, J., Wilson CH.; Onterman A. (2002). Understanding water quality parameters for citrus irrigation and drainage systems. Circular No. 1406. IFAS Extension. University of Florida. Gainesville, FL, EUA. 19 p.
- Cortez J., Troyo D., Garatuza P. (2009). Correlación entre Indicadores de la Calidad del Agua para Uso Agrícola. Folleto Técnico N° 66. Centro de Investigación Regional del Noroeste. México. Pp 10-24.
- Eller A. y Vivas A. (2013). Importancia del Servicio Meteorológico Urbano (UNCa) en el Conocimiento del Clima de San Fernando del Valle de Catamarca. Biología en Agronomía. Vol 3. N°2. Pp 78-88.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2003). Review of World Water Resources by Country. Water Reports 23, FAO, Rome, Italy, 110 pp.
- Grillo, M.(2005). Diseño de la Red cloacal y Tratamiento de los Efluentes de la Localidad de El Chalten. II Convención Ambiental Universitaria Patagónica. Pp 17-21.
- INDEC. (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda del año 2010.
- Libhaber M. (2007). Reuso de Aguas Servidas para Riego, el Concepto de Embalses de Estabilización. Foro Latinoamericano de Saneamiento. Pp 2-5. Cali, Colombia.
- Lorenzo E., Ocaña J., Fernandez L., Bataller M.(2009). Reuso de Aguas Residuales Domésticas para Riego Agrícola. Valoración Crítica. Revista CENIC Ciencias Biológicas, Vol. 40, No. 1. Habana. Cuba.
- Marín G., Aragón R., Gómez B. (2002). Análisis Químico de Suelos y Agua. Manual de laboratorio. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. España.
- OMS (1989). Directrices Sanitarias sobre el Uso de Aguas Residuales en Agricultura y Acuicultura. Serie de Informes Técnicos de la OMS N°778. Ginebra.
- Palacios V. y Aceves N. (1970). Instructivo para el muestreo, Registro de Datos e Interpretación de la Calidad del Agua para Riego Agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo. Mexico.
- Perez J (2011). Manual para Determinar la Calidad de Agua de Riego. Universidad Veracruzana. Veracruz. Republica Mexicana.
- Porta, J. (2010). Introducción a la Edafología: Uso y Protección de Suelos. 2º edición. Editorial Mundi-Prensa. Madrid. España.-
- Pozzi J. (2004). Consideraciones Generales sobre la Reutilización de Aguas Residuales Depuradas para Riego Agrícola. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. N° 76. Pp 68-72. AIDIS. Argentina.
- Sancha A., Castillo G., Espinoza C., Mena M. (2005). Criterios de Calidad de Aguas o Efluentes Tratados para uso en Riego. Informe Final. Universidad de Chile. Gobierno de Chile.
http://bibliotecadigital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/pdf_aguas/informe_final.pdf
- Saracho M., Flores M., Monferran C., Rodríguez C., Iriarte A. (2010). Lagunas de Estabilización de Catamarca. Evaluación de su funcionamiento. Avances en Energía Renovable y Medio Ambiente. Vol 14, pp 151-157. Salta. Argentina.
- Silva, J.; Torres, P.; Madera, C. (2008) "Reúso de aguas residuales domesticas en agricultura". Una Revisión de la Agronomía Colombiana. Vol. 26 N° 2. Colombia
- UNESCO (2012). Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. WWAP.
<http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/for-the-media/>
- World Health Organization. (2006). Guidelines for the Safe Use of wastewater, excreta and greywater. Volume 2: Wastewater use in Agriculture

ABSTRACT

At present, large amounts of water are used inefficiently and demand is growing faster than nature can supply, especially for agricultural use. These problems could be mitigated by reusing treated wastewater. The objectives are to determine the quality of treated wastewater by stabilization ponds of Capital of Catamarca, with indicators based on agronomic quality, predominant type of salts and correlate these indicators in order to simplify their characterization. Effluent samples were analyzed and chemical quality for irrigation was evaluated using indicators of saline dangerousness and sodium hazard. Correlational statistical analysis between the indicators used were performed. The chemical quality of treated effluent for irrigation can be classified low sodium hazard and moderate salinity, according to the applied criteria and can be used on soils with moderate to good permeability, the most important indicators to simplify their characterization are SAR and EC.

Keywords: agronomic quality indicators, wastewater reuse, irrigation, waste stabilization ponds.