

EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUA RESIDUAL TRATADA PARA RIEGO EN EL VALLE ALTO DE LA CIUDAD DE COCHABAMBA

EVALUATION OF THE QUALITY OF WASTEWATER TREATED FOR IRRIGATION IN THE VALLE ALTO OF THE CITY OF COCHABAMBA

Ivette Echeverría^{1,2}, Gabriel Aliaga¹, Oliver Saavedra¹

¹Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)
Universidad Privada Boliviana

²Fundación Aguatuya, Cochabamba-Bolivia
echeverria.ivette@upb.edu

(Recibido el 24 de junio de 2024, aceptado para publicación el 12 de agosto 2024)

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en analizar la calidad fisicoquímica de los efluentes generados por un grupo de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) situadas en el Valle Alto de Cochabamba para determinar su aptitud de reúso agrícola. Los principales parámetros analizados fueron $(\text{SO}_4)^{-2}$, $(\text{Cl})^{-1}$, $(\text{Na})^{+1}$, $(\text{Ca})^{+2}$, $(\text{Mg})^{+2}$, $(\text{HCO}_3)^{-1}$ y $(\text{NO}_3)^{-1}$. Además, se estimaron los índices relación de adsorción de sodio (RAS) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI). En los efluentes evaluados se encontraron las siguientes concentraciones: 132,00 - 252,00 mg/L de $(\text{SO}_4)^{-2}$; 3,02 - 9,48 meq/L de $(\text{Cl})^{-1}$; 11,79 - 17,59 meq/L de $(\text{Na})^{+1}$; 40,00 - 100,00 mg/L de $(\text{Ca})^{+2}$; 75,39 - 92,42 mg/L de $(\text{Mg})^{+2}$; 153,72 - 473,36 mg/L de $(\text{HCO}_3)^{-1}$; y 17,80 - 37,80 mg/L de $(\text{NO}_3)^{-1}$. Las estimaciones del RAS de los efluentes presentaron valores comprendidos entre 5,41 y 8,01. Los resultados de PSI estuvieron comprendidos entre 6,29-9,55. Debido a sus concentraciones moderadas y en base a la clasificación de los efluentes como C3-S2 según la clasificación RIVERSIDE, los efluentes podrían emplearse para el riego de suelos que tengan un drenaje adecuado. Debido a que ninguna de las plantas de tratamiento realiza procesos de desinfección se recomienda limitar la aplicación de los efluentes a cultivos que no se consuman sin procesar, de tallo alto, forrajeros y de moderada tolerancia a la salinidad. Se recomienda además la aplicación de técnicas de riego que alternen el riego con aguas residuales y otras fuentes de suministro de agua para reducir los riesgos asociados a la salinidad.

Palabras Clave: Aguas Residuales, Calidad del Efluente, Riego, RAS, PSI.

ABSTRACT

The present study focuses on analyzing the physicochemical quality of the effluents generated by a group of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) located in the Valle Alto of Cochabamba to determine their suitability for agricultural reuse. The main parameters analyzed were $(\text{SO}_4)^{-2}$, $(\text{Cl})^{-1}$, $(\text{Na})^{+1}$, $(\text{Ca})^{+2}$, $(\text{Mg})^{+2}$, $(\text{HCO}_3)^{-1}$ and $(\text{NO}_3)^{-1}$. Additionally, the Sodium Adsorption Ratio (SAR) and exchangeable sodium percentage (PSI) were estimated. The evaluated effluents showed the following concentrations: 132.00 - 252.00 mg/L of $(\text{SO}_4)^{-2}$; 3.02 - 9.48 meq/L of $(\text{Cl})^{-1}$; 11.79 - 17.59 meq/L of $(\text{Na})^{+1}$; 40.00 - 100.00 mg/L of $(\text{Ca})^{+2}$; 75.39 - 92.42 mg/L of $(\text{Mg})^{+2}$; 153.72 - 473.36 mg/L of $(\text{HCO}_3)^{-1}$; and 17.80 - 37.80 mg/L of $(\text{NO}_3)^{-1}$. The SAR values of the effluents ranged from 5.41 to 8.01. On the other hand, the PSI values ranged from 6.29 to 9.55. Due to their moderate concentrations and based on the classification of the effluents as C3-S2 according to the Riverside classification, the effluents could be used for irrigating soils with adequate drainage. Since none of the treatment plants perform disinfection processes, it is recommended to limit the application of the effluents to crops that are not consumed raw, tall-stem, forage crops, and those with moderate salt tolerance. It is also recommended to apply irrigation techniques that alternate the use of wastewater with other water supply sources to reduce the risks associated with salinity.

Keywords: Wastewater, Effluent Quality, Irrigation, SAR, PSI.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel global, se enfrenta un desafío significativo relacionado con la insuficiencia de suministro de agua para el riego de cultivos. En 2021, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación advirtió una disminución del 20% de agua dulce disponible para el consumo humano [1]. Este déficit repercute directamente en la escasez de alimentos para ciertas poblaciones y la alteración de la diversidad biológica que se sustenta mediante una simbiosis con el desarrollo de los cultivos, entre otros efectos adversos.

El uso de aguas residuales sin tratamiento para el riego de cultivos es una práctica común en Bolivia, representando un riesgo significativo debido a la presencia de contaminantes químicos y microbiológicos, así como las altas

concentraciones de las sales disueltas. Estos factores pueden afectar a la calidad del suelo y al desarrollo de las plantas. En los departamentos de La Paz y Cochabamba, al menos 5 000 hectáreas de tierras agrícolas, lo que equivale al 86% del total disponible, se riegan con aguas residuales [2], lo cual plantea riesgos para la salud y el medioambiente.

La región del Valle Alto de Cochabamba, es una de las principales proveedoras de productos agrícolas. El Valle Alto, concentra a los municipios de San Benito, Punata, Toco, Cliza, Sacabamba, Cuchumuela, Arani, Tarata, Tacachi, Villa Rivero, Arbieta, Anzaldo, Tolata, Santiviáñez y Capinota. Muchos de estos municipios tienen vocación ganadera y agrícola. Entre los cultivos principales de la región se encuentra el durazno, la uva, el maíz y la alfalfa, entre otros. [3]. Debido al déficit hídrico en esta región, las prácticas de riego dependen del régimen de precipitaciones y se suplementan con pozos de agua, manantiales, ríos, vertientes y, en algunos casos, efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). En la actualidad, la demanda de agua ha superado el crecimiento demográfico, y más de la mitad de la población experimenta escasez de agua durante al menos un mes al año [4].

En algunos casos, las aguas de ríos y manantiales, están afectados por la contaminación. Los agricultores que optan por utilizar estas fuentes para el riego se benefician de los elevados niveles de fósforo y nitratos que contienen. Aunque estos nutrientes favorecen el desarrollo de los cultivos, la presencia de contaminantes microbiológicos y físico-químicos pueden ocasionar efectos adversos para la salud en el consumo de los cultivos regados con agua contaminada [2].

El reúso de las aguas residuales puede realizarse suministrando el agua directamente desde las plantas de tratamiento o de manera indirecta cuando se emplean las aguas residuales recolectadas aguas abajo. Las concentraciones de materia orgánica y nutrientes de las aguas residuales pueden ser beneficiosas para los cultivos, no obstante, las aguas residuales también pueden contener algunos contaminantes químicos tóxicos y microorganismos patógenos que tienen impactos negativos para el medioambiente y la salud.

Tanto en el reúso directo como en el indirecto, la calidad del agua de riego está determinada por la eficiencia de las PTAR en la remoción de contaminantes. Los diseños convencionales de las PTAR están orientados a remover materia orgánica disuelta y en suspensión además de contaminantes microbiológicos, sin embargo, las tecnologías convencionales no están diseñadas para remover las sales disueltas que se encuentran en las aguas residuales [5]. El efecto de la aplicación prolongada de aguas residuales con altos contenidos de sales disueltas, es un impacto a largo plazo, a diferencia de los impactos a corto plazo ocasionados por los microorganismos patógenos. Estos efectos pueden ser por ejemplo: la salinización de los suelos por la acumulación de las sales, el incremento de las concentraciones de sodio en el suelo, entre otros [6]. El incremento de salinidad en el suelo es quizás el efecto negativo más importante en el medioambiente que si no se controla puede provocar una disminución en su productividad a largo plazo. El contenido de sales se mide a través de una serie de parámetros como la conductividad, los sólidos disueltos, las concentraciones de sodio y cloruros o la relación de adsorción de sodio (RAS) [7]. Esta última indica la razón entre la concentración de sodio (elemento perjudicial) en relación a las concentraciones de calcio y magnesio (elementos beneficiosos). La salinidad ocasiona el deterioro de la estructura del suelo, la disminución de su permeabilidad y la reducción del rendimiento de los cultivos debido a los efectos tóxicos y osmóticos [8]. Por estas razones, aun cuando existe el beneficio del reúso de aguas residuales en términos de sostenibilidad, el reúso sigue siendo controversial entre los expertos y responsables políticos [9]. Cuando se utilizan aguas residuales para el riego, la calidad del agua debe controlarse estrictamente teniendo en cuenta factores como la posible acumulación de sustancias nocivas para el crecimiento de los cultivos y el posible daño al suelo por la transformación de sus características físicas y químicas [10]. Para ello, varias organizaciones internacionales, como la OMS (Organización Mundial de la Salud), y la FAO (Food Agriculture and Organization), y la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA) han elaborado directrices para establecer criterios de calidad y orientaciones sobre la reutilización de las aguas residuales tratadas con fines de riego [11], [12]. Además, varios países han adoptado dichas normativas o cuentan con normativas propias adaptadas para cada contexto [13]. En Bolivia no se tiene una normativa que regule el uso del agua residual en la agricultura, pero se cuenta con una guía técnica para el reúso de aguas residuales en la agricultura que incorpora lineamientos para prácticas seguras durante el proceso de reutilización de agua tratada para riego.

Varios estudios a nivel internacional han evaluado la potencialidad del reúso de las aguas residuales para el riego [14], [15], [16]. A nivel local, existen muy pocos estudios acerca de la calidad del agua residual y su alineación con normativas para reúso en el riego de cultivos [17] y no existe ninguno en donde se evalúen los potenciales efectos de la concentración de las sales.

En este estudio se aborda la evaluación de la calidad de los efluentes de distintas tecnologías de tratamiento. Las PTAR, evaluadas se ubican en los municipios de Villa el Carmen, Ucureña, Tolata y Colque Rancho. Las tecnologías empleadas en las distintas PTAR son las siguientes: la PTAR de Villa el Carmen utiliza un sistema de reactores anaerobios de flujo ascendente y biofiltros horizontales [18]; la PTAR de Ucureña se basa en reactores anaerobios de flujo ascendente y reactores de lodos activados; la PTAR de Tolata emplea reactores anaerobios compartimentados y biofiltros verticales y horizontales [19]; y la PTAR de Colque Rancho cuenta con reactores anaerobios compartimentados y lagunas de estabilización [20].

Estas diversas tecnologías han demostrado resultados aceptables en términos de remoción de materia orgánica y contaminantes en suspensión [18], [19], [20]. Los efluentes de estas PTAR son beneficiosos para muchos agricultores y, además, el agua residual tratada se emplea para irrigar zonas cercanas a las PTAR. Sin embargo, los procesos de tratamiento son convencionales y no están diseñados para la remoción de sales.

El objetivo de este estudio es evaluar la calidad de los efluentes en términos de su idoneidad para el reúso en riego agrícola con especial énfasis en la concentración de las sales. La metodología propuesta se ha aplicado a cuatro PTARs en el valle alto de Cochabamba.

2. MATERIAL Y METODOLOGÍA

2.1. Área de Estudio

La región del Valle Alto, situada a 35 km al sur de la ciudad de Cochabamba, está conformada por varios municipios, entre ellos Cliza, Tolata y Punata [21]. Estos territorios se distinguen por poseer un clima semiárido y moderado, con una temperatura media anual que varía entre 16 y 17 °C, y una precipitación promedio anual de 385 a 470 mm. La actividad económica predominante se enfoca en la ganadería y la agricultura, siendo esta última el pilar de su sustento económico [22]. La agricultura en esta región se especializa en diversos cultivos como el maíz, la alfalfa, los duraznos, las fresas, entre otros. Una parte significativa de estos cultivos se riega mediante el uso de aguas residuales tratadas provenientes de las plantas de tratamiento [2].

Las PTARs de Villa el Carmen y la PTAR de Ucareña se encuentran en Cliza. En Tolata, se ubica la PTAR de Tolata, y en Punata, la PTAR de Colque Rancho. En la Figura 1 se presenta la ubicación de las cuatro plantas de tratamiento evaluadas. A continuación, se describen cada una de las PTARs.



Figura 1: Ubicación general de las cuatro PTARs evaluadas en el Valle alto de Cochabamba.

2.1.1. PTAR de Villa el Carmen

La operación de la PTAR comenzó en el año 2014 y beneficia a una población de 10 000 habitantes. Esta instalación está ubicada a una altitud de 2 715 metros sobre el nivel del mar [18]. El proceso de tratamiento se ilustra en la Figura 2. En términos generales, el tratamiento comienza con un cárcamo de bombeo que contiene una cámara de rejillas para la retención de sólidos gruesos. Luego, el agua pasa por un pretratamiento donde se eliminan los sólidos finos mayores a 6 mm. Después del pretratamiento, el agua se dirige a un tanque de homogeneización, donde el caudal se distribuye en cinco módulos de tratamiento. Cada módulo tiene un conjunto de tratamientos similares que operan en paralelo. El primer tratamiento en cada módulo es un tanque desgrasador, que separa el agua del aceite y la grasa en suspensión. A continuación, el agua pasa por un biorreactor anaeróbico para descomponer la materia orgánica, luego por una cámara de aireación para estabilizarla, y finalmente por un biofiltro horizontal para promover una mayor descomposición de la materia orgánica. El agua residual tratada se descarga en un canal de concreto que la lleva a áreas de cultivo.

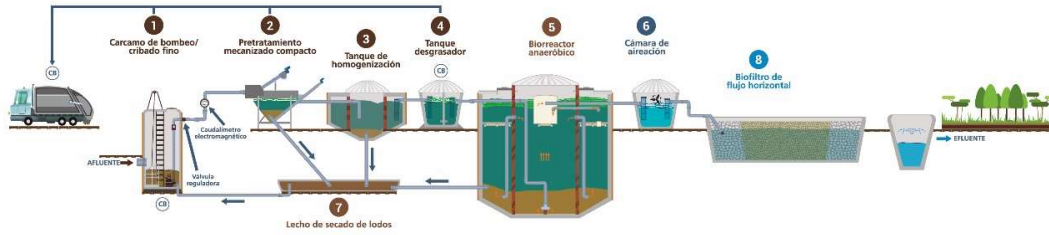


Figura 2: Planta de tratamiento de aguas residuales de Villa el Carmen.

2.1.2. PTAR de Ucuireña

La operación de la PTAR de Ucuireña comenzó en septiembre de 2021, siendo una de las instalaciones más recientes en entrar en funcionamiento. Situada a una altitud de 2 715 metros sobre el nivel del mar, esta PTAR recoge las aguas residuales de las comunidades de Ucuireña y Retamas. El proceso de tratamiento se detalla en la Figura 3. Inicia con una cámara de rejas para la retención de sólidos gruesos, seguida por un cárcamo de bombeo que distribuye el caudal a los dos trenes de tratamiento de la PTAR. Ambos trenes de tratamiento, que operan simultáneamente, cuentan con los mismos componentes de tratamiento. Luego del cárcamo de bombeo, el agua pasa por un pretratamiento compuesto por un tamiz parabólico, un desarenador y un desgrasador, destinados a retener sólidos finos con un diámetro superior a 1,5 mm y separar el material graso en suspensión. A continuación, el caudal ingresa al reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), donde la materia orgánica se descompone en compuestos más simples mediante procesos metabólicos anaeróbicos. Posteriormente, el agua pasa al reactor de lodos activados, donde se inyecta aire mecánicamente para descomponer la materia orgánica mediante bacterias que se alimentan de oxígeno. Los lodos en suspensión generados son dirigidos a un sedimentador secundario. Finalmente, el agua residual tratada se utiliza para el riego de cultivos.

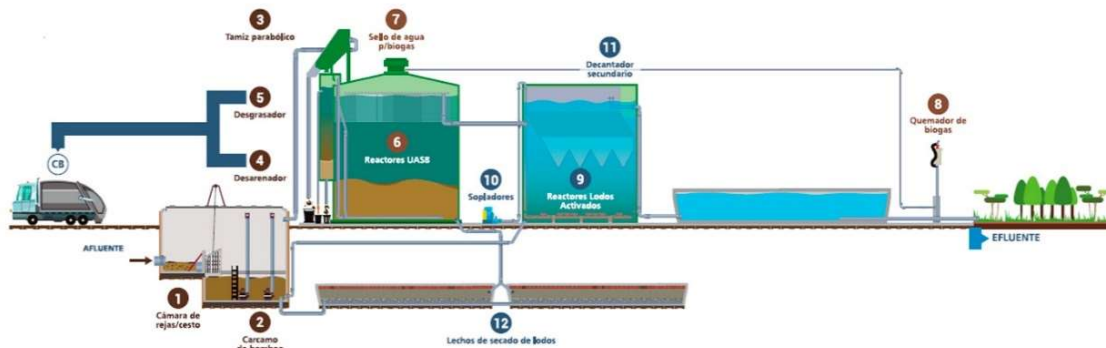


Figura 3: Planta de tratamiento de aguas residuales de Ucuireña.

2.1.3. PTAR de Tolata

La PTAR de Tolata fue inaugurada en el año 2018 para servir a una población de 2 250 habitantes. Ubicada a una altitud de 2 702 metros sobre el nivel del mar, esta PTAR cumple un doble propósito al contribuir tanto al riego de cultivos como a la protección del río Sulty contra la contaminación [19]. En la Figura 4 se muestra su proceso de tratamiento, el cual comienza con una cámara de rejas para la retención de sólidos gruesos con un diámetro superior a 5 cm. Luego, el flujo de agua se dirige al cárcamo de bombeo, donde se eleva y se distribuye al tamiz rotatorio para separar los sólidos finos con un diámetro mayor a 3 mm. A continuación, pasa por la cámara desgrasadora para retener las grasas suspendidas. Desde este punto, el caudal se distribuye a dos trenes de tratamiento que funcionan de manera paralela y contienen los mismos componentes. El primer componente es el reactor anaerobio compartimentado, que contribuye a la sedimentación y digestión de la materia orgánica. Después de este tratamiento, el agua pasa por el biofiltro horizontal y vertical, que ayudan en la descomposición de la carga orgánica. Finalmente, los efluentes se combinan y pasan a un tanque de contacto de cloro antes de ser utilizados para el riego.

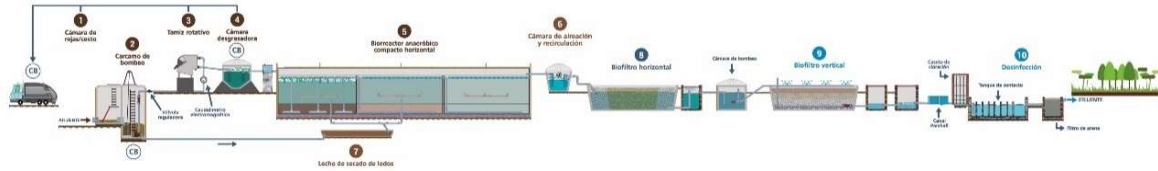


Figura 4: Planta de tratamiento de aguas residuales de Tolata.

2.1.4. PTAR de Colque Rancho

La PTAR de Colque Rancho comenzó a operar en 1997 y se encuentra a una altitud de 2705 m.s.n.m., cerca de la laguna Sulty. Inicialmente, el sistema de tratamiento se basaba en lagunas estabilizantes, que incluían lagunas anaeróbicas, facultativas y de maduración. Sin embargo, para el año 2017, la PTAR había completado su ciclo de funcionamiento y se decidió realizar labores de mantenimiento y reacondicionamiento [20]. Actualmente, el proceso de tratamiento se organiza de la siguiente manera: comienza con un cribado grueso para retener sólidos con diámetros superiores a 5 cm, seguido de un cribado fino para retener sólidos con diámetros superiores a 5 mm. El flujo de agua continúa hacia un desarenador para eliminar las partículas más pesadas y luego pasa por una cámara desgrasadora para eliminar las grasas en suspensión. Posteriormente, el flujo se bombea hacia los reactores anaerobios compartimentados (RAC), donde se divide en dos corrientes para someterse al tratamiento del RAC. Luego, el flujo se uniformiza y se distribuye nuevamente en tres lagunas anaeróbicas, dos lagunas facultativas y tres lagunas de maduración, todas ellas trabajando en paralelo como lagunas de estabilización. Finalmente, el efluente se descarga en un canal de concreto que se dirige hacia las zonas de cultivo. El proceso de tratamiento se ilustra en la Figura 5.

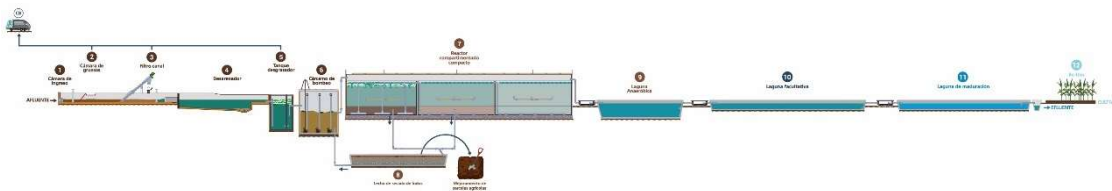


Figura 5: Planta de tratamiento de aguas residuales de Colque Rancho.

2.2. Muestreo y Análisis

En el año 2022, se llevaron a cabo muestreos con el propósito de examinar los parámetros físico-químicos asociados con criterios de riego. Estos muestreos se efectuaron durante los meses de mayo, junio y noviembre de dicho año. Las muestras fueron recolectadas en recipientes de polietileno y selladas herméticamente. Se tomaron muestras tanto del afluente como del efluente de cada PTAR, y los recipientes fueron adecuadamente preparados con la muestra antes de añadir la cantidad requerida para su análisis en laboratorio. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas a una temperatura inferior a 4 °C. Los métodos empleados para analizar los parámetros físico-químicos fueron los siguientes: conductimetría para la conductividad eléctrica, turbidimetría para los sulfatos, volumetría para los cloruros, colorimetría para los nitratos, volumetría para los bicarbonatos, espectrofotometría de absorción atómica para el sodio, calcio y magnesio. Estos procedimientos analíticos están detallados en el *Standard Methods of Examination of Water and Wastewater* [23]. El análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó empleando el método colorimétrico de flujo cerrado, los sólidos suspendidos totales (SST) se analizaron por gravimetría, y el nitrógeno amoniacal N-NH₃ se analizó empleando métodos espectrofotométricos. Todos estos parámetros fueron medidos en los laboratorios de la UPB y los resultados se pueden encontrar en [18], [19], [20].

2.3. Indicadores de Calidad de Agua para Riego

Los parámetros para la evaluación de la calidad del agua de riego están relacionados con el objetivo de proteger el medio ambiente, garantizar el rendimiento y calidad de los cultivos y mantener la productividad del suelo. Estos parámetros consisten en ciertas características físicas, químicas y microbiológicas del agua además de algunos indicadores que se estiman a partir de las mismas. A lo largo del tiempo, numerosas directrices de calidad del agua han sido desarrolladas por muchos investigadores para el uso del agua en el riego definiendo diferentes condiciones, como la restricción de cultivos [13]. Entre los parámetros que usualmente se incluyen están: pH, conductividad, salinidad, concentraciones de cationes mayoritarios como calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), sodio (Na⁺) y potasio (K⁺), y aniones mayoritarios como cloruros (Cl⁻), sulfatos (SO₄²⁻), bicarbonatos (HCO₃⁻) y carbonatos (CO₃²⁻); contenidos de materia orgánica medidos como DBO y DQO; concentración de nutrientes como nitrógeno y fósforo; y concentración de sólidos en suspensión, entre otros.

En este estudio, se enfatizó en el análisis de la concentración de sales tomando como indicadores a la conductividad eléctrica (CE), aniones y cationes mayoritarios. Los resultados obtenidos de la caracterización de los efluentes se compararon con estándares internacionales establecidos para el reúso de las aguas residuales en la agricultura [7], [11], [12], [24].

Además, se analizaron indicadores asociados con el riesgo de afección al suelo como el índice de relación de adsorción de sodio y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

En el riego es fundamental prestar especial atención a las concentraciones de sodio, ya que niveles elevados pueden dar lugar al desarrollo de un suelo alcalino [25], lo cual ocasiona problemas físicos en el suelo y reduce su permeabilidad. Este fenómeno se debe a que el sodio reemplaza a los iones de calcio y magnesio adsorbidos. Se recomienda que las concentraciones de sodio para riego no excedan los 9,0 meq/L [11]. Sin embargo, las concentraciones de sodio por sí mismas no determinan el nivel de riesgo en la aplicación en el riego. Para ello es necesario estimar el RAS, que está determinado por la siguiente ecuación (1):

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

donde Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} están en meq/L.

Por otro lado, es fundamental analizar el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) para determinar qué cultivos pueden tolerar las concentraciones de sodio presentes en el agua residual tratada. El PSI, se empleó en este estudio como parámetro de referencia para indicar la cantidad de sodio que diferentes cultivos pueden tolerar. El valor del PSI se estima a partir de la siguiente ecuación (2):

$$PSI = \frac{100 (-0,0126 + 0,01475 RAS)}{1 + (0,0126 + 0,01475 RAS)} \quad (2)$$

donde RAS es la relación de adsorción de sodio.

Ambos indicadores, el RAS y el PSI representan el potencial del agua de ocasionar la sodificación del suelo. Estos índices miden la proporción relativa de sodio frente a calcio y magnesio en el agua. Niveles altos de sodio en relación al calcio y magnesio pueden ocasionar la dispersión de partículas en el suelo afectando negativamente su estructura. Esto a su vez puede resultar en una menor infiltración del suelo afectando al rendimiento del cultivo y ocasionando problemas de drenaje [24]. Los resultados de este estudio fueron evaluados frente a los valores establecidos por la norma Riverside, un sistema propuesto por el Laboratorio de Salinidad de EE.UU. (USSL, por sus siglas en inglés), utilizado para evaluar la calidad de agua de riego [26].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en la Tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización de los diferentes parámetros físico – químicos evaluados en los efluentes de las PTAR, junto con un análisis de los resultados en comparación con lineamientos y normativas establecidos para la evaluación de la calidad del agua de riego.

Según los resultados presentados en la Tabla 1, se aprecia que los valores de conductividad de todos los efluentes restringen su uso, recomendando su aplicación moderada en el riego. Esto está principalmente relacionado con la tolerancia a la salinidad de los cultivos, ya que existen cultivos más o menos tolerantes a la salinidad [28] e indirectamente relacionado con la concentración de sales que pueden acumularse en los suelos.

En relación a la concentración de nitratos y nitrógeno amoniacal, ambos considerados nutrientes aprovechables por los cultivos, se aprecia que ninguna de las PTAR alcanza a cumplir con las restricciones impuestas para la aplicación del agua residual en el riego, siendo las concentraciones más elevadas en los efluentes de las PTAR de Tolata y Colquerrancho y por tanto también mayores las restricciones para estas dos plantas. En las PTAR mencionadas, se emplean principalmente procesos anaeróbicos para el tratamiento por lo que la eliminación de nitratos no se ve favorecida, pero en general, ninguna de las PTAR ha sido diseñada con un enfoque en la eliminación de nutrientes precisamente porque su destino es el reúso en el riego. La evaluación de la concentración de nutrientes y sus posibles afectaciones están determinados en este caso con los requerimientos de los cultivos y no así relacionado con aspectos relacionados a la salud. Sin embargo, si bien los nutrientes son esenciales para el desarrollo del cultivo, un exceso de estos puede ocasionar daños al medio ambiente al infiltrarse a través del suelo contaminando las aguas subterráneas. Por otro lado, un exceso de nutrientes puede ocasionar la sobreestimulación del crecimiento del cultivo, retrasar la maduración o producir un cultivo de baja calidad [7].

TABLA 1 - RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS EFLUENTES ANALIZADOS

Parámetro	Unidad	PTAR Villa El Carmen	PTAR Ucureña	PTAR Tolata	PTAR Colquerrancho	Estándar referencial	Referencia
pH	-	7,2	7,1	7,4	7,5	6,5-8,4	[11], [12]
Conductividad	mS/cm	1,67	1,45	1,92	1,32	Grado de restricción <0,7 ninguno 0,7-3,0 bajo a moderado >3,0 Severo	[7], [11], [12]
(SO ₄) ⁻²	mg/l	190	252	132	190	500	[24]
(Cl) ⁻¹	meq/l	4,09	3,02	9,48	4,74	2-4 Plantas sensibles 4-10 Plantas moderadamente tolerantes >10 inadecuado o plantas tolerantes	[27]
Na ⁺¹	meq/l	16,5	11,8	17,6	13,5	Grado de restricción <3 Ninguno 3-9 Bajo a moderado >9 Severo	[7], [11]
	mg/l	377,9	2070,2	403	309,1		
Ca ⁺²	meq/l	40	92	100	84	0-20	[11]
	mg/l	800	1840	2000	1680	230 Riego restringido*	[24]
Mg ⁺²	mg/l	92,42	80,26	75,39	85,12	100 Riego restringido *	[24]
(NO ₃) ⁻¹	mg/l	17,80	27,30	37,80	32,40	30-45 Riego restringido * Grado de restricción: <5 ninguno 5-30 Bajo a moderado >30 Severo	[24] [11]
DQO	mg/l	249	93	95	333	<100	[13]
SST	mg/l	460	34	18	78	<30 alimentos procesados	[12]
N-NH ₃	mg/l	46	43	41,7	74	<30 como nitrógeno total	[25]

*Restringido para su aplicación en el riego de vegetales que se consumen cocinados, parques, márgenes de carretera, árboles frutales, paisajismo, cultivos de campo e industriales y árboles forestales.

En cuanto a las concentraciones de DQO y sólidos en suspensión, se tiene que, aunque algunas PTAR son muy eficientes en su eliminación, los estándares internacionales referenciales son bastante exigentes. En relación a la DQO, se exige que la concentración sea menor a 100 mg/l para su aplicación en el riego. Estas concentraciones solo se alcanzan en las PTAR de Ucureña y Tolata. En las PTAR de Colquerrancho y Villa El Carmen no se llegan a cumplir con estas exigencias. De igual forma, los parámetros relacionados con los SST resultan exigentes para su aplicación en el riego requiriéndose una concentración de SST menor a 30 mg/l para poder regar alimentos que se procesan antes de su consumo. Estas concentraciones solo se alcanzan en las PTAR de Ucureña y Tolata.

En cuanto a las concentraciones de aniones y cationes, se observan concentraciones de sulfatos y cloruros dentro de los rangos permitidos para su aplicación, considerando el riego de cultivos con moderada tolerancia a la salinidad. En cambio, las concentraciones de sodio, calcio y magnesio son más elevadas que los rangos recomendados para su aplicación. Sin embargo, la concentración de estos tres últimos parámetros por sí sola no permite una interpretación global, por lo que es necesario la estimación de índices de riesgo. Como se ha discutido previamente, las concentraciones elevadas de sodio afectan tanto de manera directa como indirecta al crecimiento y desarrollo de los cultivos. El sodio, presente como sal, puede afectar indirectamente la estructura del suelo debido a su toxicidad, lo que a su vez puede tener un impacto directo en los procesos de fotosíntesis de los cultivos. Por otro lado, las concentraciones elevadas de calcio pueden resultar en agua dura, lo que puede provocar incrustaciones en áreas expuestas al líquido. Sin embargo, concentraciones moderadas de calcio pueden promover un buen flujo en el suelo, permitiendo que el agua

se filtre a través de la tierra gracias a los iones de calcio [25]. Las estimaciones de estos índices relacionados con los riesgos de sodicidad del suelo, como el RAS y el PSI, se presentan a continuación.

3.1. Estimación de Indicadores Relacionados con Riesgo de Sodicidad

Los resultados de la estimación del RAS y PSI se presentan a continuación en la Tabla 2.

TABLA 2 - RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DEL RAS Y PSI

Parámetro	Unidad	PTAR Villa El Carmen	PTAR Ucureña	PTAR Tolata	PTAR Colquerrancho
RAS	-	8,01	5,41	7,98	6,47
PSI	-	9,55	6,29	9,51	7,65

Normalmente, el alto contenido de sodio suele puede provocar la defloculación de las partículas de arcilla del suelo, lo que reduce la capacidad de infiltración además de todos los efectos antes mencionados. Por lo tanto, la mejor manera de evaluar el posible efecto del agua en la permeabilidad del suelo es considerar el RAS junto con la C.E [26] del efluente de cada PTAR. Los resultados del RAS obtenidos se compararon con los valores establecidos en la Tabla 3, donde, además del propio valor del RAS, se emplea la conductividad para determinar el grado de restricción que debería aplicarse en el riego utilizando efluentes de las PTAR.

TABLA 3 - EVALUACIÓN DEL RIESGO DE SODICIDAD EN TÉRMINOS DE INFILTRACIÓN DE AGUA EN EL SUELO [11]

Observaciones	Grado de restricción en el uso			
	C.E. (dS/m) y RAS	Ninguno	Moderado	Severo
Satisfactorio, algunos cultivos sensibles a la sal serán afectados	Si RAS 0-3 y C.E.	> 0,7	0,7 – 0,2	< 0,2
Adecuado para la mayoría de los cultivos, la condición de salinidad se desarrollará a menos que el lavado y el drenaje sean adecuados	Si RAS 3-6 y C.E. Si RAS 6-12 y C.E.	> 0,2 > 1,9	0,2 – 0,3 1,9 – 0,5	< 0,3 < 0,5
Adecuado para las plantas tolerantes a la sal, el lavado y el drenaje son imperativos	Si RAS 12-20 y C.E. Si RAS 20-40 y C.E.	> 2,9 > 5,0	2,9 – 1,3 5,0 – 2,9	< 1,3 < 2,9

Los índices de RAS de los efluentes de las cuatro PTARs se encuentran en un rango de 5,41 a 8,01. Empleando la Tabla 3 para la interpretación de los resultados, se encuentra que su grado de restricción para el uso es moderado, siendo el agua residual tratada adecuada para la mayoría de los cultivos, teniendo en cuenta que se deben tener previsiones para contar con drenajes adecuados en el suelo [25].

En esta evaluación, donde se toman en cuenta de forma conjunta el índice RAS y la C.E., se empleó el diagrama de RIVERSIDE (Figura 6), que combina estos efectos para establecer una visión más global de la idoneidad del agua residual tratada para su uso en riego. Los resultados en color azul representan a los efluentes de la PTAR de Villa el Carmen, en amarillo los efluentes de la PTAR de Ucureña, en rojo efluentes de la PTAR de Tolata y en verde los efluentes de la PTAR de Colque Rancho.

En el diagrama se ilustra que las cuatro PTAR (representadas por puntos de colores) se encuentran en el cuadrante C3 – S2, lo que indica que es agua de salinidad alta y que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, y también, que el agua tiene un contenido medio en sodio, y, por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina como arcilla y franco arcillosos. Este resultado, es muy parecido a un estudio realizado en Bagdad, la capital de Iraq, zona que tiene características geográficas similares. En este estudio se determinó que los efluentes de la PTAR de Iraq, se encuentran clasificados en el cuadrante C3 – S1, lo cual indica que es un agua de salinidad media que puede ser utilizado para diferentes cultivos [16].

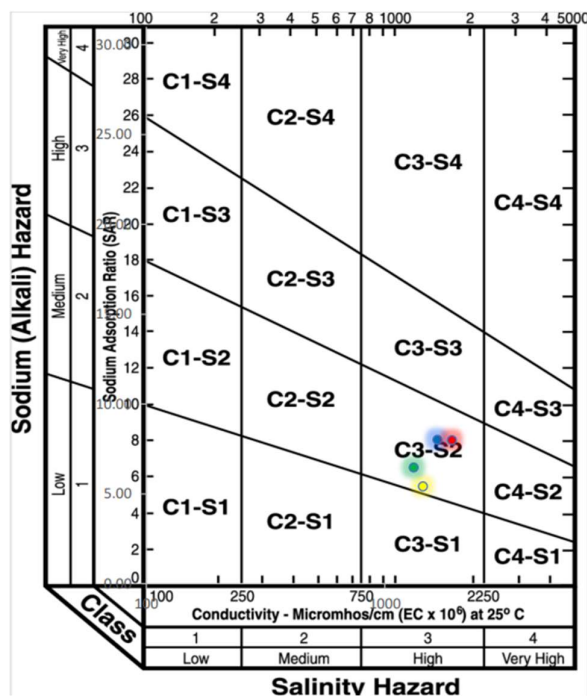


Figura 6: Diagrama de RAS vs C.E.

Fuente: [26]

Los resultados del PSI se compararon frente a valores establecidos de la tolerancia a la salinidad de los cultivos que se indican en la Tabla 4.

TABLA 4- SENSIBILIDAD DE CULTIVOS AL PSI.

Sensibles PSI<15	Semitolerantes 15<PSI<40	Tolerante PSI>40
Palta	Zanahoria	Alfalfa
Algodón	Lechuga	Cebada
Maíz	Caña de azúcar	Remolacha
Arveja	Mostaza	
Toronja	Avena	
Naranja	Arroz	
Durazno	Espinaca	
Mandarina	Tomate	
Lenteja	Trigo	
Maní		

En Valle Alto de Cochabamba, la producción agrícola se centra en el cultivo de durazno y maíz. Como indica la Tabla 4, estos cultivos son sensibles al porcentaje de adsorción de sodio (PSI) [25]. Observando los índices de PSI en de la Tabla 4, se determinó que el efluente de las PTAR es apto para regar prácticamente cualquier cultivo, ya que sus índices se encuentran por debajo de 15 PSI.

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se realizó la evaluación de las características físico-químicas de los efluentes de cuatro plantas de tratamiento de distinta configuración situadas en el Valle Alto de Cochabamba, enfatizando en la concentración de aniones y cationes relacionados con la salinidad y sus riesgos. Los resultados de la caracterización de los efluentes se compararon con estándares internacionales para determinar su idoneidad para el riego de cultivos propios de la zona.

A partir de la caracterización de los efluentes, se encontraron los siguientes rangos de concentraciones de aniones y cationes mayoritarios: 132,00 - 252,00 mg/L de $(SO_4)^{-2}$; 3,02 - 9,48 meq/L de $(Cl)^{-1}$; 11,79 - 17,59 meq/L de $(Na)^{+1}$; 40,00 - 100,00 mg/L de $(Ca)^{+2}$; 75,39 - 92,42 mg/L de $(Mg)^{+2}$; 153,72 - 473,36 mg/L de $(HCO_3)^{-1}$; y 17,80 - 37,80 mg/L de $(NO_3)^{-1}$. Los valores de conductividad se encuentran en el rango de 1,32 - 1,92 mS/cm. Las estimaciones de la

Relación de Adsorción de Sodio (RAS) de los efluentes presentaron valores comprendidos entre 5,41 y 8,01. Los Porcentajes de Sodio Intercambiable (PSI) obtenidos oscilaron entre 6,29 y 9,55. Los resultados de esta caracterización demuestran que los efluentes de esta zona tienen un contenido moderado de sales y, en la mayoría de los casos, la restricción es moderada dentro de los lineamientos de los estándares existentes. De igual forma, los valores de RAS indican un riesgo moderado para la aplicación de las aguas residuales en el riego.

La interpretación global de estos resultados sugiere que la aplicación de los efluentes tratados debe realizarse con ciertas restricciones, principalmente considerando un drenaje adecuado de los sistemas de riego para prevenir la acumulación de sales y los efectos en el medioambiente.

El diagrama de RIVERSIDE permitió la clasificación de los efluentes de las cuatro PTARs dentro de una clase C3-S2. Esta clasificación indica que, debido a su salinidad, el agua puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje y empleando volúmenes altos de agua. Además, esta clasificación corresponde a un efluente con un contenido medio de sodio, que no requiere grandes precauciones en su aplicación y que permite una infiltración adecuada en la estructura del suelo.

Dado que ninguna de las PTAR contempla procesos de desinfección, es recomendable emplear el agua residual en el riego de cultivos que no se consuman sin procesar, de tallo alto o forrajeros y de moderada tolerancia a la salinidad. Otras estrategias recomendadas para disminuir los riesgos asociados a la salinidad, son la aplicación de técnicas de riego que combinen el uso alternado de aguas residuales y otras fuentes de suministro de agua.

REFERENCIAS

- [1] UN, «El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático | Noticias ONU». Accedido: 19 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732>
- [2] R. Cisneros, Sanz, Zael, y Terán, José Antonio, «Uso de aguas residuales para riego en Bolivia. Producción, comercialización y consumo de cultivos irrigados con aguas residuales en la región del altiplano», Banco Mundial, 2015.
- [3] Los Tiempos, «Región Valles: potencialmente agrícola». Accedido: 19 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lostiempos.com/actualidad/local/20170915/region-valles-potencialmente-agricola>
- [4] Organización de las naciones unidas, «Objetivos de desarrollo sostenible». Accedido: 19 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- [5] H. Jeong, H. Kim, T. Jang, y S. Park, «Assessing the effects of indirect wastewater reuse on paddy irrigation in the Osan River watershed in Korea using the SWAT model», *Agric. Water Manag.*, vol. 163, n.º C, pp. 393-402, 2016.
- [6] H. Al-Hamaiedeh y M. Bino, «Effect of treated grey water reuse in irrigation on soil and plants», *Desalination*, vol. 256, n.º 1, pp. 115-119, jun. 2010, doi: 10.1016/j.desal.2010.02.004.
- [7] World Health Organization, «Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater in agriculture and aquaculture», World Health Organization. Accedido: 5 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/78265/9241546824_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [8] D. J. Halliwell, K. M. Barlow, y D. M. Nash, «A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems», *Soil Res.*, vol. 39, n.º 6, p. 1259, 2001, doi: 10.1071/SR00047.
- [9] S. Ofori, A. Puškáčová, I. Růžičková, y J. Wanner, «Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons», *Sci. Total Environ.*, vol. 760, p. 144026, mar. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144026.
- [10] J. Xu, L. Wu, A. C. Chang, y Y. Zhang, «Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: a preliminary assessment», *J. Hazard. Mater.*, vol. 183, n.º 1-3, pp. 780-786, nov. 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.094.
- [11] Ayers, R.S. y Westcot, D.W., «Water quality for agriculture», FAO, Rome, 29 rev 1, 1985. Accedido: 19 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/4/t0234e/T0234E01.htm#ch1.2.1>
- [12] L. United States Environmental Protection Agency, *Guidelines for Water Reuse*, EPA/600/R-12/618, Washington D.C., septiembre de 2012.
- [13] H. Jeong, H. Kim, y T. Jang, «Irrigation Water Quality Standards for Indirect Wastewater Reuse in Agriculture: A Contribution toward Sustainable Wastewater Reuse in South Korea», *Water*, vol. 8, n.º 4, p. 169, abr. 2016, doi: 10.3390/w8040169.
- [14] F. M. Moghadam, M. Mahdavi, A. Ebrahimi, H. R. Tashauoei, y A. H. Mahvi, «Feasibility Study of Wastewater Reuse for Irrigation in Isfahan, Iran», 2015.
- [15] S. Barbagallo, G. L. Cirelli, S. Consoli, F. Licciardello, A. Marzo, y A. Toscano, «Analysis of treated wastewater reuse potential for irrigation in Sicily», *Water Sci. Technol.*, vol. 65, n.º 11, pp. 2024-2033, jun. 2012, doi: 10.2166/wst.2012.102.

- [16] A. H. M. J. Alobaidy, M. A. Al-Sameraiy, A. J. Kadhem, y A. A. Majeed, «Evaluation of Treated Municipal Wastewater Quality for Irrigation», *J. Environ. Prot.*, vol. 01, n.º 03, pp. 216-225, 2010, doi: 10.4236/jep.2010.13026.
- [17] I. Echeverría, L. Machicado, O. Saavedra, R. Escalera, G. Heredia, y R. Montoya, «DOMESTIC WASTEWATER TREATED BY ANAEROBIC BAFFLED REACTORS AND GRAVEL FILTERS AS A RESOURCE TO BE USED IN AGRICULTURE», *Investig. Desarro.*, vol. 19, n.º 1, pp. 63-72, jul. 2019, doi: 10.23881/idupbo.019.1-4i.
- [18] O. Saavedra *et al.*, «Evaluation of a domestic wastewater treatment plant at an intermediate city in Cochabamba, Bolivia», *Water Pract. Technol.*, vol. 14, n.º 4, pp. 908-920, dic. 2019, doi: 10.2166/wpt.2019.071.
- [19] I. Echeverría, O. Saavedra, R. Escalera, G. Heredia, C. Yoshimura, y R. Montoya, «Small-Scale Operation of an Integrated Anaerobic Baffled Reactor and Biofilter: Factors Affecting Its Performance», *J. Environ. Eng.*, vol. 148, n.º 11, p. 04022065, nov. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002047.
- [20] I. Echeverría, C. Escalante, O. Saavedra, R. Escalera, G. Heredia, y R. Montoya, «EVALUACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES BASADA EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN ACOPLADAS A UN REACTOR ANAEROBIO COMPARTIMENTADO», *Investig. Desarro.*, vol. 21, n.º 1, jul. 2021, doi: 10.23881/idupbo.021.1-3i.
- [21] A. Durán, H. Willet, F. Rocha, Á. Urquidí, J. Iriarte, y J. Tórrez, «Inundaciones en el valle alto de Cochabamba.», SNV Bolivia, Reporte de investigación, 2009.
- [22] Ministerio de Desarrollo y Economía Plural, «Estado Económico Productivo del Departamento de Cochabamba», Estado Plurinacional de Bolivia, La Paz-Bolivia, 2020. Accedido: 19 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://siip.produccion.gob.bo/noticias/files/BI_1409202060f03_Cbba2020.pdf
- [23] APHA, AWWA, y WEF, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- [24] Ouattar, Said, Naimi, Mustapha, Abu Awwad, Ahmad, Karam, Jean, Bourrass, Mohamed, y Reiss, Peter, «Pilot Project Reuse of Treated Wastewater in Agriculture in Meknes, Morocco», DAI-USAID, Report 4: Guidelines for treated wastewater reuse in agriculture. Accedido: 18 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADP168.pdf
- [25] Ministerio de Medio Ambiente y Agua, «Guía técnica para el reúso de las aguas residuales en la agricultura», Bolivia, 2013. Accedido: 19 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.bivica.org/files/5508_guia-tecnica-reuso-aguas.pdf
- [26] L. E. Allison *et al.*, en *Agricultural Handbook No. 60*, United States Government printing office, 1954.
- [27] US Salinity Laboratory, «Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils», Department of Agriculture, Handbook N°60, 1954.
- [28] E. C. Carrasco, M. O. Escobar, y C. R. Ayala, «Evaluación de la relación de adsorción de sodio de las aguas de la red hidrográfica del Valle del Mezquital, Hidalgo* Evaluation of sodium adsorption ratio of the waters of the hydrographic network from the Mezquital Valley, Hidalgo».