

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**EFFECTOS DE EFLUENTES TRATADOS DE LA INDUSTRIA PAPELERA Y
DESTILERÍA DE ALCOHOL EN LOS PARÁMETROS QUÍMICOS DEL SUELO
AGRÍCOLA**

POR

NICOLÁS ANDRÉS BURZIO ESQUERRÉ

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN – CHILE
2024**

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EFFECTOS DE EFLUENTES TRATADOS DE LA INDUSTRIA PAPELERA Y
DESTILERÍA DE ALCOHOL EN LOS PARÁMETROS QUÍMICOS DEL SUELO
AGRÍCOLA**

POR

NICOLÁS ANDRÉS BURZIO ESQUERRÉ

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CONCEPCIÓN – CHILE
2024

Aprobada por:

Profesor Asistente, Anali Rosas G
Ing. Agrónoma, Dra.Cs. Rec. Naturales.

Guía

Profesor Asistente Winfred Espejo C.
Med. Veterinario, Dr. Cs. Ambientales.

Asesor

Profesora María Dolores López B.
Lcda. en Química, Dr. en Quím. Agr.
Geol. y Edaf.

Asesor

Profesor Asociado Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.
Mención producción Animal

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	6
Summary.....	6
Introducción.....	7
Desarrollo y Discusión	9
Conclusión.....	23
Referencias.....	23

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Información de bases de datos de paper y review acerca de efectos de efluentes tratadas en la industria de papelera y destilería de alcohol.....	10
Tabla 2 Requisitos de calidad del agua según normativas de la FAO y NCh 1333 en Chile y su comparación con efluentes tratados de la industria papelera y de destilería de alcohol	13
Tabla 3 Efectos del riego con distintas concentraciones de efluentes tratados de la industria papelera en un suelo arcilloso arenosos.....	19
Tabla 4 Efectos del riego con distintas concentraciones de efluentes tratados de la industria destilería de alcohol en un suelo franco con cultivo de <i>Vicia faba</i> L.(Haba).....	21

EFFECTOS DE EFLUENTES TRATADOS DE LA INDUSTRIA PAPELERA Y DESTILERÍA DE ALCOHOL EN LOS PARÁMETROS QUÍMICOS DEL SUELO AGRÍCOLA

EFFECTS OF TREATED EFFLUENTS FROM THE PAPER INDUSTRY AND ALCOHOL DISTILLERY ON THE CHEMICAL PARAMETERS OF AGRICULTURAL SOIL

Palabras índice adicionales: Efluentes de papelería, efluente de destilería, micronutrientes, metales pesados y salinidad.

RESUMEN

En los últimos años se ha estado incorporando el uso de aguas residuales proveniente de efluentes industriales en los suelos agrícolas. Considerando que en Chile los principales efluentes industriales son de papelerías y destilerías de alcohol, el objetivo de esta revisión bibliográfica es analizar estudios del efecto de efluentes tratadas de la industria papelería y destilería de alcohol sobre las propiedades químicas de suelos agrícolas y el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales. Considerando la normativa internacional de la FAO (1994) y la normativa nacional NCh 1333, los estudios de caracterización de efluentes de papelería y destilería de alcohol muestran que con los tratamientos que se les hacen a estas aguas residuales actualmente, incluso aplicados en dosis bajas, no logran cumplir con los límites establecidos por estas normativas. Específicamente, los principales parámetros que están fuera de norma son: sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, ion cloruro, ion bicarbonato, ion sulfato, Mn, Cd y Cr.

Los estudios de aplicación de los efluentes industriales muestran un aumento en parámetros químicos del suelo como, conductividad eléctrica, pH y el contenido de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , ion sulfato, Zn, Cd, Cu, Mn y Cr, llegando a alcanzar niveles de tóxicos para el suelo, la planta y los alimentos producidos.

SUMMARY

In recent years, the use of wastewater from industrial effluents in agricultural soils

has been incorporated. Considering that in Chile the main industrial effluents are from paper mills and alcohol distilleries, the objective of this bibliographic review is to analyze studies of the effect of treated effluents of the paper industry and alcohol distillery on the chemical properties of agricultural soils and compliance with regulations. National and international. Considering the international regulations of the FAO (1994) and the national regulations NCh 1333, the characterization studies of paper mill and alcohol distillery effluents show that with the treatments currently carried out on these wastewaters, even applied in low doses, they fail to comply with the limits established by these regulations. Specifically, the main parameters that are out of standard are: total dissolved solids, electrical conductivity, chloride ion, bicarbonate ion, sulfate ion, Mn, Cd and Cr.

Application studies of industrial effluents show an increase in soil chemical parameters such as electrical conductivity, pH and the content of Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, sulfate ion, Zn, Cd, Cu, Mn and Cr, reaching toxic levels for the soil, the plant and the food produced.

INTRODUCCIÓN

Se ha estado incorporando en el último tiempo el uso de aguas residuales en los suelos agrícola. Esta práctica se ve influenciada por varios factores como la escasez de recursos de agua dulce, la fácil disponibilidad de aguas residuales y el déficit de agua de riego (Zhang y Shen, 2021; Alayu y Leta 2021). El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 de la ONU (2015), impulsa entre otras cosas, la reutilización de aguas residuales tratadas, ampliando la cooperación internacional y apoyando a los países en desarrollo. Además, la ONU promueve la capacitación y ofrece programas relativos al aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos, al uso de mejores tecnologías y finalmente al tratamiento de las aguas residuales. Para 2030, la ONU (2015) busca reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y un aumento de la reutilización segura de las aguas a nivel mundial. Para dimensionar la situación actual, ante la falta de agua, en el mundo se utilizan 15 millones de m³ de aguas residuales sin tratar para el riego de cultivos (Alexandratos y Bruinsma, 2012). La reutilización de las aguas residuales ocurre principalmente en países

industrializados, en desarrollo y en zonas principalmente áridas (FAO, 2013; Petousi et al., 2015). En Israel, alrededor del 95% de las aguas residuales se trata, y aproximadamente un 86% de esta se utiliza nuevamente en actividades como el riego agrícola, el riego de espacios públicos como parques, y para mantener caudales ecológicos (IWA, 2015).

Por aguas residuales o se refiere a la acción y efecto del ser humano al introducir materias contaminantes, formas de energía o inducir condiciones en el agua de modo directo o indirecta. Esto implica por consecuencia, alteraciones perjudiciales de su calidad con relación a los usos posteriores o con su función ecológica (Díaz et al., 2012). Las aguas residuales se componen de componentes físicos, químicos y biológicos; es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, ya sea suspendidos o disueltos (Díaz et al., 2012).

La composición de las aguas residuales varía en función de su origen. Pueden ser aguas residuales domésticas, blancas, agrícolas e industriales (Espigares y Pérez 1985). Espigares y Pérez (1985) describieron las aguas residuales industriales, también denominados efluentes industriales, como aquellas que provienen de los procesos realizados en fábricas y establecimientos industriales, y que contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos, grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable y depende de las diversas actividades industriales.

Se plantean, por ende, inquietudes sobre los posibles impactos de estos efluentes en la calidad del suelo debido a la introducción de diferentes sustancias perjudiciales en el suelo como sales disueltas, sólidos en suspensión, contaminantes y tóxicos (Radini et al., 2023). Estas sustancias pueden tener efectos adversos en las propiedades físicas, biológicas, químicas y físico-químicas de los suelos que son irrigados con aguas residuales tratadas y no tratadas, debido a las limitaciones de las plantas de tratamientos (Mamoun et al. 2016; Cirelli et al., 2012; Mok et al., 2014).

Es crucial que los efectos de los efluentes industriales tratados, que son aguas residuales industriales que tienen un tratamiento, ya sea primario, secundario y terciario para reducir sus niveles de contaminantes (BCN, 2018), en las

características del suelo agrícola se comprendan y evalúen adecuadamente antes de que se pueda recomendar ampliamente su uso para el riego y lograr desarrollar contramedidas efectivas lo cual minimizaría los efectos adversos.

El objetivo de esta investigación bibliográfica fue analizar estudios del efecto de efluentes tratados de la industria papelera y destilería de alcohol sobre las propiedades químicas de suelos agrícolas. Específicamente, se analizaron los estudios que caracterizan los principales efluentes tratados de la industria de papelera y destilería de alcohol y su relación con normativas nacionales e internacionales. Para después identificar las principales propiedades químicas del suelo que se ven alteradas con el uso de efluentes tratados de la industria papelera y destilería de alcohol.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Utilizando los motores de búsqueda, ScienceDirect y Scopus, introduciendo las palabras effluent and paper mill, effluent and distillery, effluent, paper mill, irrigation and soil, effluent, distillery, irrigation and soil.

Para la caracterización del efluente de papelera y el efluente de destilería la base de datos ScienceDirect arroja un promedio de 500 resultados. Por otra parte, en la base de datos Scopus hay 513 publicaciones acerca de caracterización de efluentes de papelera. Mientras que para el efluente de destilería y su caracterización química en esta base de datos el número de publicaciones supera las 2000. Respecto de la evaluación del efecto de los efluentes de papelera y los efluentes de destilería en las propiedades químicas del suelo, en la base de datos ScienceDirect hay más de 700 publicaciones para el efluente de papelera y sobre 200 publicaciones para el efluente de destilería. Por otra parte, en la base de datos Scopus, respecto del efecto del efluente de papelera sobre las propiedades química del suelo el número de publicaciones supera 700 y respecto del efluente de destilería sobre las características químicas del suelo el número de publicaciones las 400.

Se seccionaron los estudios de Chopra (2011) y Kumar y Choprar (2013), como ejemplos, dado que presentan suficientes análisis para comparar con la normativa

internacional FAO (1994) y la normativa chilena NCh 1333.

Tabla 1. Información de bases de datos de paper y review acerca de efectos de efluentes tratados de la industria papelera y destilería de alcohol.

Base de datos	Palabras claves	Cantidad
ScienceDirect	Effluent, paper mill, chemical and heavy metal.....	492
	Effluent, distillery, chemical, heavy metal.....	595
	Effluent, paper mil, irrigation chemical, characteristics and of soil.....	768
	Effluent, distillery, irrigation, chemical, characteristics and of soil.....	205
Scopus	Effluent, paper mill, chemical and heavy metal.....	513
	Effluent, distillery, chemical, heavy metal.....	2193
	Effluent, paper mil, irrigation chemical, characteristics and of soil.....	768
	Effluent, distillery, irrigation, chemical, characteristics and of soil.....	430

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 1. EFLUENTES TRATADOS DE LA INDUSTRIA PAPELERA Y DE DESTILERÍA DE ALCOHOL

La industria papelera es un sector relevante en Chile, ya que cuenta con extensas áreas boscosas que son la materia prima esencial para la producción de papel (Luraschi, 2005). Empresas como CMPC y Arauco son líderes conocidas tanto a nivel nacional como internacional por la creciente producción de pulpa, papel y productos de celulosa (Luraschi, 2005).

Entre las aguas residuales industriales, las de la industria papelera, están en constante crecimiento, siendo una de las más difíciles de tratar ya que contienen muchos contaminantes de diversos tipos (Crini y Badot, 2007; Pokhrel y Viraraghavan, 2005). Las principales características son, una alta cantidad de

sólidos en suspensión, turbidez, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluidos colorantes, metales pesados y compuestos fenólicos (Crini y Badot, 2007; Pokhrel y Viraraghavan, 2005). Otro punto importante es su elevado uso de agua, de entre 75.708 a 227.124 litros por tonelada de producto (Nemerow y Dasgupta, 1991), lo que produce grandes cantidades de agua residuales. Los efluentes de las fábricas de papel que son vertidos finalmente en ecosistemas de agua dulce, estuarios y marinos alteran los hábitats acuáticos, afectan la vida acuática y tienen un impacto adverso en la salud humana (Lacorte et al., 2003)

En cuanto a la industria de la destilería de alcohol, es la segunda industria de procesamiento de productos agrícolas que generan más aguas residuales, después de la pulpa de papel, y producen aproximadamente una cantidad de 12 a 15 litros de aguas residuales por litro de producción de etanol (Wagha y Nemadeb, 2018). Las aguas residuales de la destilería son ácidas, de color marrón oscuro, tienen una alta demanda biológica de oxígeno y una demanda química de oxígeno, contienen diversos contenidos de sal y metales pesados (Ratna et al., 2021).

Por lo tanto, resulta imperativo comprender estas dos importantes industrias analizando su toxicidad, los efectos que se observan en el suelo para contribuir con su adecuada gestión para la sostenibilidad ambiental.

CAPÍTULO 2. ENTIDADES REGULADORAS DE NORMAS DE CALIDAD Y PARÁMETROS DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES PARA RIEGO AGRÍCOLA

Los requisitos de calidad del agua para los distintos parámetros pueden variar según las normativas y regulaciones internacionales o más bien específicamente de cada país.

La Norma Chilena Oficial NCh 1333, modificada por última vez el año 1987 (INN, 1994), es una de las 2 que se tomaron cuenta para esta monografía, y se basó en los requisitos de calidad del agua para diferentes usos, donde se consideró solo el uso para riego agrícola. El organismo responsable del estudio y preparación de las normas técnicas a nivel nacional, es el Instituto Nacional de Normalización, INN. Es

parte de la International Organization For Standardization (ISO) y de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT), actuando como representante ante dichos organismos. Se tomó en consideración esta norma para tener referencia de las normas establecidas en nuestro territorio y para garantizar tanto a nivel global como local los requisitos necesarios a cumplir ya sea para elaborar un proyecto o buscar la información acertada.

A nivel internacional se utilizaron los parámetros de la FAO (1994), principalmente porque adoptar esta norma ayudaría a comparar con los requisitos actualizados.

La evaluación de los efectos de los compuestos disueltos en el agua de riego, según la FAO (1994), se fundamenta en los siguientes indicadores de calidad:

1. Salinidad
2. pH
3. Iones específicos: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , y B
4. Nitrógeno
5. Elementos traza
6. Infiltración

La salinidad del agua se mide a través de dos parámetros de calidad: sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica, que tiene un efecto de reducción del crecimiento de los cultivos (FAO, 1994).

El pH es un análisis de agua que se emplea principalmente para identificar las aguas que presentan características anormales. En el contexto del riego, el intervalo de pH considerado normal oscila entre 6,5 y 8,4. Cualquier valor que se aparte de este rango sugiere que el agua requiere un análisis adicional para una evaluación más detallada (FAO, 1994).

Respecto a los iones específicos el grado de daño causado va a depender del tiempo, la concentración, el uso de agua y la sensibilidad del cultivo (FAO, 1994).

El nitrógeno estimula el crecimiento y es un nutriente para las plantas, por lo tanto, si se utiliza en cantidades excesivas, los cultivos pueden llegar a ser afectados debido a un estímulo exagerado del crecimiento, una demora en la

madurez o una disminución en la calidad (FAO,1994).

Cantidades excesivas de elementos traza en el agua de riego causa una acumulación excesiva en el tejido vegetal y una reducción en el crecimiento, por lo tanto, pueden resultar peligrosos para la salud de las personas (FAO, 1994). El 85% de los oligoelementos se fijan y acumulan rápidamente en el suelo, generando que el cultivo sea inutilizable y el suelo no productivo (FAO,1994).

Respecto a la tasa de infiltración de agua, ésta aumenta su velocidad cuando hay más salinidad y disminuye cuando hay menos salinidad. También aumenta la infiltración de agua cuando hay una alta relación de adsorción de sodio (RAS), que es debido a una mayor concentración de sodio en comparación con el calcio y el magnesio. Así que, en resumen, para evaluar bien el impacto final en la tasa de infiltración de agua, hay que tener en cuenta ambos factores, la salinidad y la relación de adsorción de sodio (FAO,1994).

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES EFLUENTES TRATADOS DE LA INDUSTRIA PAPELERA Y DESTILERÍA DE ALCOHOL Y SU RELACIÓN CON NORMATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES

Como se mencionó anteriormente los parámetros más importantes para caracterizar los efluentes industriales de acuerdo a la FAO son la salinidad, pH, iones específicos, N, elementos traza e infiltración. Entre los estudios de caracterización de efluentes industriales que cuentan con la mayoría de los parámetros exigidos por FAO, esta Chopra (2011) y Kumar y Chopra (2013), cuyos resultados se muestran en la Tabla 2. La información recogida en estos estudios proporciona datos objetivos sobre la composición de las aguas residuales industriales, permitiendo compararlas con las normas regulatorias.

Como se aprecia en la Tabla 2 las dosis de 5% y 25% de efluentes dieron como resultado con la mayoría de los límites establecidos por las normas establecidas para este tipo de parámetros.

Tabla 2. Requisitos de calidad del agua según normativas de la FAO y NCh 1333 en Chile y su comparación con efluentes tratados de la industria papelera y de

destilería de alcohol.

		Límite máximo		Efluente de papelería	Efluente de destilería
		FAO (1994)	NCh 1333	Concentración efluente (%)	
				5	25
Parámetros					
Salinidad					
	Solidos disueltos totales (SDT) (mg L ⁻¹)	2000	2000	860	2041
	Conductividad eléctrica (CE) (dS/m)	3	3	1,34	3,45
Parámetros químicos					
	pH	6,5-8,4	5,5-9	7,54	7,52
Nutrientes (mg L ⁻¹)					
	N	30	-	-	-
	P	-	-	-	-
	K	-	-	-	-
Iones específicos (mg L ⁻¹)					
	Ion cloruro (Cl ⁻)	356	200	64,5	475

Continuación Tabla 2. Requisitos de calidad del agua según normativas de la FAO y NCh 1333 en Chile y su comparación con 2 tipos de aguas industriales.

	Catión sodio (Na ⁺)	207	207	34,8	72
	Ion Sulfato (SO ₄ ²⁻)	-	250	51	312
	Ion bicarbonato (HCO ₃ ³⁻)	183	-	265	229
	Ion carbonato (CO ₃ ²⁻)	-	-	119	94
	B	0,3	0,75	-	-
Micronutrientes (mg L⁻¹)					
	Zn	2	2	0,32	1,14
	Mn	0,2	0,2	-	0,45
	Fe	5	5	-	-
	Cu	0,2	0,2	0,1	1,13
Elementos traza (mg L⁻¹)					
	Cd	0,01	0,01	0,13	3,87
	Pb	-	5	0,05	-
	Cr	0,1	0,1	0,06	0,74
	Ar	0,1	0,1	-	-
	Hg	-	0,001	-	-
	Ni	0,2	0,2	-	-

Fuente: INN (1987), FAO (1994), Chopra (2011) y Kumar y Chopra (2013)

3.1. Comparación de un efluente tratado de papelera con respecto a las normativas FAO (1994) y NCh 1333

El objetivo de la investigación realizada por Chopra (2013) fue llevar a cabo un estudio de campo realizado para analizar el impacto del riego de los efluentes de una fábrica de papel sobre las características del suelo en los que considera parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. El experimento se llevó a cabo con distintas concentraciones de efluentes (0%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, y 100%). Los efluentes que se utilizaron fueron sometidos un tratamiento secundario, para lograr reducir la DBO y los sólidos. Se evaluó a nivel de invernadero en macetas en un suelo de tipo arcilloso-arenoso, que fue recibiendo cada semana una aplicación de 500 ml del efluente del molino de papel. Estos efluentes, con las concentraciones ya mencionadas, los administraron a una tasa correspondiente de 5, 10, 25, 50, 75, y 100 ml kg⁻¹ de suelo, respectivamente, y luego para diluir los efluentes se utilizó finalmente agua de pozo. Los suelos de las macetas se mantuvieron durante 12 semanas bajo tratamiento (por lo general, en ese lapso de tiempo crecen la mayoría de los cultivos) y no se permitió el drenaje. El suelo se analizó antes y después del riego considerando varios parámetros físico-químicos. Los datos se analizaron a través de un análisis estadístico donde utilizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA), se calculó la media y la desviación estándar.

En relación con la Tabla 2, se hará un análisis de los principales parámetros del suelo que se encuentren en cumplimiento y estén dentro de los límites establecidos por las normativas implementadas para el riego con efluente tratadas de la industria. Así mismo, se examinarán los parámetros que superen ampliamente los límites establecidos y otros que, si logren cumplir con respecto a las normativas.

La salinidad del efluente en dosis de 5% (ver Tabla 2) se encuentra dentro de los límites establecidos por las 2 normas, cumpliendo con los estándares de calidad para el riego agrícola. Siendo los sólidos disueltos totales y la conductividad eléctrica un factor clave dentro de este ámbito según la FAO (1994). Respecto al pH, este se encuentra dentro del rango permitido, cumpliendo con las 2 normas tanto nacional como internacional. En cuanto a los iones específicos todos se encuentran dentro del límite permitido por las normas en estudio excepto el ion bicarbonato. En la norma internacional el ion bicarbonato se puede apreciar que es el único parámetro que supera con un 45% el límite máximo, incumpliendo así con

la normativa. El catión sodio es el valor que se encuentra en menor cantidad en relación al valor límite de las 2 normativas. Los micronutrientes que se evaluaron, están dentro del límite máximo, tanto el Cu como el Zn se encuentran en cantidades mínimas. Por lo que cumplen tanto con la normativa internacional como con la nacional. Por último, en los elementos traza el Cr es el único que cumple con las 2 normativas, estando por debajo del límite. El Cd por el contrario supera 13 veces el límite permitido. Por lo tanto, el agua residual en esta dosis no cumple con las normativas tanto internacional como nacional.

3.2. Comparación de un efluente tratado de destilería de alcohol con respecto a las normativas FAO (1994) y NCh 1333

Los investigadores Kumar y Chopra (2013) realizaron un estudio que consistía en analizar efluentes de destilería para el cultivo de *Vicia faba L* (haba) mediante fertirrigación. Analizaron distintas concentraciones de efluentes (0%, 10%, 25%, 50%, 75%, y 100%) considerando varios de sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Los efluentes los trataron a la salida de la planta de tratamiento para reducir la contaminación. El experimento fue llevado a cabo en parcelas de 9 m² en un suelo franco, a las que se le aplicaron de manera uniforme 189 litros 2 veces en un mes, junto con agua de pozo como control. El suelo lo analizaron antes y después de la siembra y después de la cosecha del cultivo considerando varios parámetros físico-químicos. Para finalizar utilizaron parámetros agronómicos de *Vicia Faba L*. desde la germinación hasta la madurez. En el estudio realizaron un análisis estadístico mediante ANOVA, de dos vías. Utilizaron la prueba de rango múltiple de Duncan para determinar si era significativa o no la diferencia. Para los parámetros del suelo y también del cultivo con las concentraciones de los efluentes, aplicaron la media, desviación estándar y el coeficiente de correlación.

Con respecto a la Tabla 3, se hará un análisis de los principales parámetros del suelo que se encuentren dentro de los límites establecidos por las normativas implementadas. Se analizarán los parámetros que superen ampliamente los límites establecidos y algunos parámetros que cumplan con las normas.

La salinidad del efluente en dosis de 25% (ver Tabla 2) se encuentra fuera de los límites establecidos por la FAO (1994) y NCh 1333. En cuanto a los sólidos disueltos

totales y la conductividad eléctrica, sobrepasan el límite de las 2 normas establecidas. Para el caso del pH, está bien dentro del rango establecido de las 2 normativas. En los iones específicos, el ion cloruro, en torno a la norma nacional se encuentra muy por encima del límite establecido, superando en 2,4 veces el límite establecido por la norma internacional. El catión sodio respecto a las normativas es el único valor que cumple dentro del parámetro de iones específicos al estar muy por debajo de los límites. En los micronutrientes, el Zn y el Cu cumplen con las normas establecidas, siendo la diferencia de valores alejada de los límites. Por último, en cuanto a los elementos traza, el Cd supera los valores permitidos de manera excesiva, siendo 387 veces mayor respecto de la normativa nacional como internacional y Cr por su parte también supera el valor establecido por las normas. Esta agua residual tiene un exceso de metales pesados y iones específicos que impide que puede ser usada para agua para riego de acuerdo a las normas FAO (1994) y NCh 1333.

CAPÍTULO 4. EFECTO DE EFLUENTES TRATADOS DE LA INDUSTRIA PAPELERA Y DESTILERÍA DE ALCOHOL EN LAS PRINCIPALES PARAMETROS QUÍMICOS DEL SUELO AGRÍCOLA

4.1. Efectos del riego con efluentes tratados de una fábrica de papel sobre los parámetros químicos del suelo agrícola: Un estudio de invernadero

Se analizaron y caracterizaron los efluentes de la papelería con respecto a las normativas de la FAO (1994) y NCh 1333 con los parámetros principales para evaluar los efluentes industriales para riego agrícola. Luego, en la tabla 3 se presenta un estudio de campo del efecto de la aplicación del efluente de papelería sobre las propiedades del suelo.

En cuanto a la Tabla 3, se realizó un análisis comparativo de las distintas concentraciones de efluentes, observando las distintas fluctuaciones en los valores del suelo arcilloso. Se analizó en primer lugar, en base al control (0%) comparando con las concentraciones del efluente al 5%, 25%, utilizando referencias científicas para interpretar de mejor manera los valores.

Tabla 3. Efectos del riego con distintas concentraciones de efluentes tratados de la

industria papelera en un suelo arcilloso arenoso.

Parámetros Del suelo	Antes de riego con efluentes (control o testigo)		Después del riego
			Concentración efluente (%)
			5 25
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	2,08	2,43	2.73
pH	8,02	8,1	8,25
Cl ⁻ (mg kg ⁻¹)	88	107	143
HCO ₃ ³⁻ (mg kg ⁻¹)	382	394	414
CO ₃ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	228	236	245
Na ⁺ (mg kg ⁻¹)	17,6	24,7	29
K ⁺ (mg kg ⁻¹)	154	164	187
Ca ²⁺ (mg kg ⁻¹)	14,1	37	76
Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)	1,68	4,1	10,1
SO ₄ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	73	78	83
Zn (mg kg ⁻¹)	0,77	1.94	2.42
Cd (mg kg ⁻¹)	0,04	0.11	0,15
Cu (mg kg ⁻¹)	2,02	3.14	5,21
Pb (mg kg ⁻¹)	0,02	0,11	0,136
Cr (mg kg ⁻¹)	0,1	0,24	0,52

Fuente: Chopra (2011)

La conductividad eléctrica aumentó de manera progresiva a medida que se aplicó el efluente en el suelo arcilloso arenoso. La acumulación de sal a partir de este efluente, a una tasa de aplicación más alta aún, plantea mucha incertidumbre,

según Chopra (2011), quién explica que la aplicación indiscriminada de estas aguas puede generar problemas de salinidad en el suelo. El pH del suelo era alcalino (8,02) y hubo un aumento del pH, pero leve en comparación del control con agua de pozo, que, según Thompson et al., (2001) se debe a la alta capacidad amortiguadora del suelo y la presencia del ion bicarbonato y carbonato que se encuentran en grandes concentraciones de aguas residuales (que al disolverse liberan cationes libres) y que podrían ser una de las causas de la estabilidad de la reacción del suelo. Para el caso de Na^+ hubo un cambio exponencial en el suelo al aplicar la concentración al 25% del efluente, alcanzando un aumento de un 65% con respecto al agua de pozo. Lo que provoca una disminución de la densidad aparente y su capacidad de retención de agua (Chopra, 2011). Los nutrientes Mg^{2+} y Ca^{2+} incrementaron en 14% y 17 % respectivamente, al aplicar dosis de 25% de efluentes. En K^+ la diferencia de sus valores no fue tan importante como los otros nutrientes, pero de igual manera aumentó. El micronutriente Zn, aumentó sus valores a más del doble en relación a la dosis de 5% y 3 veces más en la dosis de 25% de efluente en comparación al control. El Cu incrementó a más del doble con la dosis de 25% de efluente. Los elementos traza, Cd y Cr, aumentaron en un 27% y 19% respectivamente, con la dosis de 25% de efluentes. Finalmente, estas concentraciones de efluentes hicieron que todos los parámetros del suelo aumentaran sus valores. Lo que generará en un futuro la toxicidad del suelo por exceso de micronutrientes, y afecta la composición natural de metales pesados que tiene el suelo (Chopra, 2011).

4.2. Efectos del riego con efluentes industriales tratados de una destilería de alcohol sobre los parámetros químicos del suelo: Un estudio de campo

Los efluentes industriales tratados de destilería de alcohol se examinaron con respecto a las normativas de la FAO (1994) y NCh 1333 con los parámetros principales para evaluar los efluentes industriales para riego agrícola. Posteriormente, en la Tabla 4 se muestra un estudio de campo sobre el efecto del uso del efluente de destilería de alcohol sobre las propiedades del suelo.

Tabla 4. Efectos del riego con distintas concentraciones de efluentes tratados de la industria de destilería de alcohol en un suelo franco con cultivo de *Vicia faba L.*

(haba)

Parámetros del suelo	Antes de riego con efluentes (control o testigo)	Después del riego	
		Concentración efluente (%)	
		5	25
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	2,06	2,6	2,94
pH	7,51	7,4	7
Na ⁺ (mg kg ⁻¹)	19	26	39
K ⁺ (mg kg ⁻¹)	155	165	225
Ca ²⁺ (mg kg ⁻¹)	15,4	26,8	139
Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)	1,7	4,53	22,4
SO ₄ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	74,37	88,4	113
Zn (mg kg ⁻¹)	0,62	2,14	3,75
Cd (mg kg ⁻¹)	0,74	1,44	2,74
Cu (mg kg ⁻¹)	2,48	2,28	4,41
Mn (mg kg ⁻¹)	0,84	1,24	2,3
Cr (mg kg ⁻¹)	0,56	0,52	0,86

Fuente: Kumar y Chopra (2013)

Respecto a la Tabla 4, se realizó un análisis comparativo de las distintas concentraciones de efluentes aplicados en un suelo arcilloso. Se analizó, en primer lugar, en base al control (0%) comparando con las concentraciones del efluente al 10% y 25%, utilizando referencias científicas para interpretar de mejor manera los valores.

La conductividad eléctrica incrementó sus valores en el suelo en un 43% cuando se usó una dosis de 25% de efluente de destilería. Según Chandra et al., (2009) explica que el aumento podría deberse a la concentración de sales de potasio en el suelo. Respecto al pH del suelo, antes del riego era de carácter alcalino (7,51), al aplicar la dosis de 25% del efluente su valor fue disminuyendo hasta ser de carácter neutro (7). Los nutrientes en el suelo Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ aumentaron en el suelo

con dosis de 25%. El Na^+ se duplicó aproximadamente 2,1 veces, K^+ aumentó en cerca de 1,5 veces, Ca^{2+} en 9 veces, y Mg^{2+} experimentó un aumento de alrededor de 13 veces. El ion específico SO_4^{2-} incrementó su valor en 52% con respecto al 25% de dosis de efluente. El micronutriente Zn tuvo un cambio exponencial en el suelo al aplicar la concentración al 25% del efluente, alcanzando un aumento de 6 veces con respecto al control (0%). El Cu disminuyó primero sus valores en un 8% en relación a la primera dosis aplicada de efluente y luego aumentó en un 93% más en la dosis de 25% de efluente en comparación a la dosis de 10%. Respecto a los elementos traza Cd, Mn y Cr incrementaron sus valores de manera importante por efecto de la dosis de 10% de efluentes, específicamente, aumentaron su valor en 3, 2,7 y 1,5 veces, respectivamente.

Los resultados obtenidos (Chopra, 2011; Kumar y Chopra, 2013) están de acuerdo con Singh (2021) que indica que las investigaciones sobre el uso prolongado de riego con aguas residuales generan acumulación de metales pesados y otros elementos tóxicos en el perfil de suelo. De acuerdo a (Singh, 2021; Radini et al., 2023) el aumento de micronutrientes y metales pesados en el suelo, se traduce en un aumento de estos elementos en los tejidos de las plantas, lo que conlleva, una alta contaminación de los alimentos y toxicidad para el medio ambiente.

El efecto de efluentes industriales de papelería y destilería se enfocan en analizar la mejora del rendimiento del suelo y de las plantas cuando en realidad hoy en día es vital lograr la sostenibilidad ambiental y preocuparse sobre la salud de los seres humanos.

PRINCIPALES PROYECCIONES

Como recomendación para futuros estudios de evaluación de la aplicación de efluentes industriales en el suelo, debería ser preocuparse de superar los desafíos en cuanto a tratamiento y lograr cumplir con las normativas internacionales enfocándose en cómo mantener un suelo sostenible en el tiempo.

CONCLUSIONES

Los efluentes industriales tratados de papelera y destilería no cumplen con las normas de la FAO (1994) y NCh 1333, superando los límites establecidos.

La aplicación de efluentes de papelera y destilería, con los actuales tratamientos, generan aumento en la salinidad, contenido de metales pesados y micronutrientes, provocando toxicidad en el suelo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alexandratos, N. y J. Bruinsma. 2012. La agricultura mundial hacia 2030/2050: la revisión de 2012. Agricultural Development Economics Division. FAO: Roma, Italia.
2. BCN. 2018. Técnicas y métodos de tratamiento para diferentes tipos de aguas residuales. Asesoría técnica parlamentaria. Chile.
3. Chopra A. 2011. Alteraciones en las características físico-químicas del suelo después del riego con efluentes de papeleras. Haridwar, India.
4. Chopra A., V. Kumar. 2013. Enriquecimiento y translocación de metales pesados en suelo y planta de Vicia faba L. (Haba) después de fertirrigación con efluente de destilería. Documento de investigación original. Universidad Gurukula Kangri. India.
5. Chandra R., R. Bhargava, S. Yadav, D. Mohan (2009). Acumulación y distribución de metales tóxicos en trigo (*Triticum aestivum* L.) y mostaza india (*Brassica campestris* L.) regados con efluentes de destilería y curtiduría. Revista de materiales peligrosos. 162(2-3):1514-1521 [en línea].
6. Cirelli G., S. Consoli, F. Licciardello, R. Aiello, F. Giuffrida, C. Leonardi. Reutilización de aguas residuales municipales tratadas en la producción de hortalizas. Gestión del agua, 104, págs. 163 - 170
7. Crini, G. y P. Badot. 2007. Tratamiento y depuración de aguas industriales contaminadas. Prensa PUFC. Besançon, Francia.
8. Díaz, E., R. Alavarado, A. y K. Camacho. 2012. El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Rev. Quivera. 14(1): 78-97. [en línea].
9. Espigares, M. y J. Pérez. 1985. Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Universidad de Granada. Granada. España

10. Alayu E.y S. Leta. 2021.Evaluation of irrigation suitability potential of brewery effluent post treated in a pilot horizontal subsurface flow constructed wetland system: implications for sustainable urban agriculture. *Heliyon*, 7, p. 07129.
11. FAO. 1994. Water quality for agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. California, EE.UU.
12. INN. 1987. Norma Chilena Oficial NCh 1333. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Instituto Nacional de Normalización de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Santiago. Chile.
13. IWA, Israel Water Authority. 2015. Water Sector in Israel. IWRM Model, Reporte. Israel.
14. Pokhrel, D. y T. Viraraghavan. 2005. Tratamiento de aguas residuales de fábricas de pulpa y papel. *Rev. científica. Medio ambiente total*. 37–58. [en línea].
15. Luraschi M. 2005. Análisis de la cadena productiva de la celulosa y el papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: Estudio de Caso Chile. Publicación de las Naciones Unidas. Santiago, Chile.
16. Mamoun A., A. Teamrat, A. Ammar, Z. Main. 2016. Alteración de las características físicas y químicas de suelos arcillosos por riego con aguas residuales tratadas. *Geoderma*. 276. 33-40.
17. Mok H., S. Barker, A. Hamilton .2014. Un modelo probabilístico cuantitativo de evaluación del riesgo microbiano de la carga de enfermedades por norovirus procedente del riego de hortalizas con aguas residuales en Shepparton. Australia. *Agua Res*. 54, págs. 347 – 362.
18. Nemerow N., A. Dasgupta. 1991. Gestión de residuos industriales y peligrosos. Nueva York. EE.UU.
19. ONU. 2015. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Cumbre de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Nueva York, Estados Unidos
20. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. 2013. Hacer frente a la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Roma, Italia
21. Petousi I., MS Fountoulakis, M. Saru, N. Nikolaidis, L. Fletcher, E. Stentiford, T. Manios (2015) Efectos del riego con aguas residuales regeneradas en olivos (*Olea europaea* L. cv. 'Koroneiki'). *Gestión del agua*. 160, págs. 33 – 40.

22. Radini S., J. Gonzalez, C. Andreola, A. Eusebi, F. Fatone. 2023. Gestión de riesgos y digitalización para superar las barreras para la reutilización segura de aguas residuales urbanas para riego: una revisión basada en la práctica europea. *Rev. de ingeniería de procesos de agua*, Vol. 53. [en línea].
23. Ratna S., S. Rastogi, R. Kumar. 2021. Tendencias actuales para la gestión de aguas residuales de destilería y sus aplicaciones emergentes para un medio ambiente sostenible. Universidad Babasaheb Bhimrao Ambedkar. India
24. Singh A. (2021). Una revisión del riego con aguas residuales: implicaciones ambientales. *Recursos, Conservación y Reciclaje*. Vol.168. [en línea].
25. Thompson G., J. Swain, M. Kay, C. Forster. 2001. Tecnología de biorecursos. 77 (3), 275-286.
26. Wagha M. y P. Nemadeb. 2018. Generación de biogás a partir del lavado de destilería por utilizando un proceso de biotecnología occidental OPUR: un estudio de caso. *Desalinización. Tratamiento de agua*. 118, 241–248.
27. Zhang Y. y Y. Shen. 2021. Wastewater irrigation: past, present, and future *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, 6 (3). [en línea].

