



## EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS PERCOLADOS DEL RELLENO SANITARIO EL PANUL BASADO EN PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA Y ADSORCIÓN CON ZEOLITA

Alejandra Gallegos-Alcaíno (\*), Rodrigo Poblete, Héctor Maureira, Juana Angélica Felipe Fernandes.

\* Universidad de La Serena, gallegos.alcaino@gmail.com

### RESUMEN

La disposición de residuos sólidos está asociada a la generación de líquidos percolados que pueden estar altamente contaminados. Como estos líquidos provienen de desechos heterogéneos en composición, arrastran todo tipo de contaminantes, por lo que se consideran residuos complejos y difíciles de tratar. Su nivel de toxicidad puede variar según los componentes, y generar impactos a nivel ambiental en el suelo, agua, fauna y flora, así como ocasionar problemas de salud en las personas. Por esta razón se realizó la evaluación de un sistema de tratamiento, basado en procesos de oxidación avanzada y adsorción, cuyo objetivo fue incrementar la calidad del Líquido Percolado (LP) procedente del Relleno Sanitario El Panul. Para lo anterior, se analizó la toxicidad y peligrosidad de los LP en el medio ambiente, se realizaron experimentos con los tratamientos UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV solar/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>, y adsorción con zeolita, para posteriormente determinar la toxicidad del LP y sus respectivos tratamientos en semillas de lechuga. Como resultados, la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> más efectiva fue de 0,67 g/L, en donde se obtuvo una disminución del 17,3% del color, y 56% de DQO, en un tiempo t<sub>30W</sub> de 140 minutos. Posteriormente se agregó 1mM de S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>, en el que se eliminó el 28,9% del color, y el 76,8% del DQO, requiriendo un tiempo t<sub>30W</sub> de 250 minutos. Finalmente se utilizó la zeolita, donde se consiguió una eliminación adicional de 36%, finalizando el tratamiento con una DQO de 4350 mg/L. Al someter estos experimentos a ensayos de toxicidad con semillas de lechuga, se estableció que el mayor porcentaje de germinación de semillas se presentó en el experimento de adsorción, con un 66,67% en la concentración de 1%. Por lo anterior, se concluye que el LP contiene sustancias tóxicas que superan las concentraciones de las normas chilenas, por lo que no debería ser reutilizada el agua tratada, se propone un pretratamiento de fotocatalisis heterogénea y un post tratamiento con fitorremediación.

**PALABRAS CLAVE:** Líquido percolado, Oxidación avanzada, Adsorción, Toxicidad.

### ABSTRACT

Solid waste disposal is associated with the generation of percolated liquids that can be highly contaminated. As these liquids come from heterogeneous waste in composition, they carry all types of contaminants, and are therefore considered complex waste that is difficult to treat. Their level of toxicity can vary depending on the components, and can generate environmental impacts on soil, water, fauna and flora, as well as cause health problems for people. For this reason, the evaluation of a treatment system based on advanced oxidation and adsorption processes was carried out with the objective of increasing the quality of the Percolated Liquid (LP) from the El Panul Landfill. To this end, the toxicity and hazardousness of LP in the environment were analyzed, experiments were carried out with UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, solar UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> treatments, and adsorption with zeolite, to later determine the toxicity of LP and its respective treatments on lettuce seeds. As results, the most effective H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration was 0.67 g/L, where a decrease of 17.3% of color and 56% of COD was obtained in a time t<sub>30W</sub> of 140 minutes. Subsequently, 1mM S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> was added, which eliminated 28.9% of the color and 76.8% of the COD, requiring a t<sub>30W</sub> time of 250 minutes. Finally, zeolite was used, where an additional removal of 36% was achieved, ending the treatment with a COD of 4350 mg/L. When these experiments were subjected to toxicity tests with lettuce seeds, it was established that the highest percentage of seed germination occurred in the adsorption experiment, with 66.67% at the 1% concentration. Therefore, it is concluded that the LP contains toxic substances that exceed the concentrations of Chilean standards, so the treated water should not be reused, and a pretreatment with heterogeneous photocatalysis and a post-treatment with phytoremediation are proposed.

**KEYWORDS:** Percolated liquid, Advanced oxidation, Adsorption, Toxicity.



### INTRODUCCIÓN

La normativa ambiental de Chile, declara en el DS. 189 que los rellenos sanitarios son instalaciones de eliminación de residuos sólidos en el cuál se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables, cuyo diseño, construcción y operación se realiza con fines de minimizar los riesgos para la salud y la seguridad de la población, y para el medio ambiente, en el cuál los residuos son compactados en capas y cubiertos diariamente, cumpliendo con la legislación vigente (VICENTE, 2012).

Sin embargo, la disposición de residuos en un relleno sanitario contribuye a la generación de olores desagradables, producir una serie de problemas medioambientales derivados del gas generado, principalmente metano, que tiene una alta contribución al efecto invernadero y la generación de los líquidos percolados (LP).

La generación de LP es una consecuencia inevitable de la disposición de residuos en los rellenos sanitarios y vertederos (WANG et al., 2010). Estos se generan a través de la percolación de los residuos depositados en el sitio producido por el agua de lluvia que entra en contacto con la basura provocando la descomposición de los compuestos orgánicos presentes en los residuos.

Existen tres tipos de LP que se pueden diferenciar en función de su edad: los jóvenes, intermedios y maduros. Con el aumento de la edad del LP se generan cambios en la contribución de compuestos orgánicos debido a la degradación de ácidos volátiles. Es así que en los LP maduros hay mayor presencia de compuesto orgánicos refractarios con mayor peso molecular, lo cual hace que su biodegradabilidad sea menor (KULIKOWSKA y KLIMIUK, 2008).

Los LP si no son gestionados adecuadamente, pueden causar contaminación en las aguas subterráneas, en las aguas superficiales y en el suelo. Además, la naturaleza y el volumen de los LP dependen principalmente de las condiciones climáticas del lugar (balance hidrológico), del tipo y composición de residuos, de la tecnología y de la edad del relleno o vertedero (STEINER y WIEGEL, 2008).

Un sistema de manejo para el tratamiento de LP se realiza a través de evaporación en bandejas impermeabilizadas en los rellenos sanitarios. En ellas, la radiación solar, el viento y la temperatura que alcanzan a la lámina, ayudan al lixiviado a cambiar de fase a estado gaseoso, produciendo su evaporación y la disolución del mismo en el aire. Este sistema, es utilizado en el relleno sanitario Santiago Poniente, que logra eliminar al menos 40.000 m<sup>3</sup> de percolado durante su operación en un año normal, lo que significa una eliminación de por lo menos el 60% del LP, sin embargo, su rendimiento no es adecuado al estar en una zona lluviosa. Por lo tanto, este sistema por sí solo no es suficiente y debe ser complementado con otro tipo de tratamientos (VICENTE, 2012).

Los tratamientos convencionales usados para la depuración de LP son dificultosos, debido a la compleja matriz que los componen. Estos líquidos contienen una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos (cationes y aniones comunes como sulfatos, cloruros, hierro, aluminio, zinc y amonio), sustancias húmicas refractarias, ácidos húmicos y fúlvicos, altas concentraciones de amonio, metales pesados, compuestos orgánicos clorados, así como benceno, tolueno y xilenos (FOO et al., 2013).

Teniendo en cuenta que las características, calidad y composición de los LP varían gradualmente en el tiempo, no se les puede dar un mismo tratamiento a distintos tipos de LP, es así, que el tratamiento adecuado para un percolado maduro son los procesos fisicoquímicos. Además, estos procesos acoplados a un tratamiento de adsorción han conseguido elevados niveles de depuración (DOOCEY y SHARRATT, 2004).

La zeolita es uno de los materiales más utilizados para los procesos de adsorción, debido a que es altamente versátil en la eliminación de un amplio rango de contaminantes orgánicos (LIU, 2021), porque exhibe una alta estabilidad térmica, un marco inorgánico de fotoestabilidad, intercambiador de iones y es capaz de adsorber sustancias selectivamente en función de su tamaño molecular (SRIKANTH et al., 2017). Por lo tanto, acoplar un tratamiento de adsorción a un proceso fisicoquímicos como los POAs hace que esta tecnología mejoré la eficiencia en la degradación y mineralización de contaminantes con baja biodegradabilidad.

Unos de los procesos fisicoquímicos utilizados en la última década son los procesos de oxidación avanzada (POAs), ya que son una alternativa con gran potencial en el tratamiento de aguas con presencia de compuestos orgánicos difíciles de degradar debido a su alta capacidad oxidante (DU et al., 2020). Los POAs generan radical hidroxilo (-OH), que es una especie química de muy corta vida, no selectiva y altamente oxidante, el cual altera la estructura química de sustancia orgánicas por reacciones de oxidación. Los POAs pueden convertir efectivamente todos los compuestos orgánicos disueltos en dióxido de carbono y ácidos minerales, a con una tasa de reacción tres o cuatro órdenes de magnitud mayor



que los procesos de oxidación convencionales, pero con costos de inversión y operación más elevados, por lo que motiva a encontrar POAs menos costosos (HURWITZ et al., 2014).

Entre los POAs más empleados se encuentran los procesos fotoFenton,  $TiO_2/UV$ ,  $UV/H_2O_2$ ,  $O_3$  y  $O_3/H_2O_2$ . De acuerdo a Pobleto et al. (2012), se han obtenido resultados muy favorables al utilizar procesos fotoFenton solares (UV) en el tratamiento de LP. Además, la utilización de ozono muestra una alta efectividad en la depuración de aguas contaminadas, el ozono en solución altera la estructura molecular de los compuestos orgánicos oxidándolos y transformándolos en sustancias más pequeñas, simples y más biodegradables, los cuales pueden ser eliminados con procesos de oxidación biológicos. El  $O_3$  tiene una alta reactividad con compuestos orgánicos húmicos y fúlvicos, de hecho, cuando está en contacto con estas sustancias se produce rupturas de enlaces insaturados o anillos aromáticos. Durante los procesos de ozonación, los compuestos objetivos son oxidados directamente por el ozono o indirectamente por  $OH\cdot$ . El radical  $OH\cdot$  tiene la capacidad de reaccionar con la mayoría de las sustancias presentes en el agua (LEE y VON GUNTEN, 2012), utilizando un pH superior a 8, además, el  $O_3$  produce  $\cdot OH$ , acelerando las reacciones de oxidación (SINGH et al., 2014).

Se ha demostrado que la aplicación de radiación ultrasonido (US) es una buena alternativa unida a los procesos fotofenton para depurar contaminantes orgánicos no biodegradables a bajo costo, porque tiene la ventaja de ser simple, segura, limpia y de no requerir reactivos químicos. Su propagación en fase líquida induce a procesos físicos y químicos por cavitación acústica, por formación, crecimiento y colapso adiabático implosivo de burbujas en el líquido (XIE et al., 2011). Este colapso produce altas temperaturas y presiones que rompen la molécula de agua en radicales  $\cdot OH$  y  $H\cdot$  en la burbuja y en su alrededor (INOUE et al., 2008).

Los POAs con el uso de ozono tienen la ventaja de no utilizar reactivos químicos que generen lodos al final del proceso, esto se suma a la utilización conjunta de US y UV, pero tienen como desventaja una alta demanda de energía (HURWITZ et al., 2014), que puede minimizarse utilizando radiación solar. Existe un gran número de tratamiento de aguas que emplean energía solar, como la pasteurización, destilación, fotocatalisis y desinfección. Se han realizado una serie de esfuerzos para aumentar su rendimiento, considerando varios aspectos, basado en (1) maximizar las dosis de radiación solar recibida, (2) el aumento de la eficacia en desinfección contra patógenos resistentes, (3) el aumento del volumen de agua tratada, y (4) la reducción de los costos de implementación. En general estas acciones han desarrollado interesantes líneas de investigación.

Esta investigación se centra en la combinación de varias tecnologías avanzadas y propone incrementar la calidad del LP con una mezcla de POAs ( $UV\ solar/O_3/H_2O_2/US/S_2O_8^{2-}$ ) acoplado a un proceso de adsorción con zeolita, para mejorar la biocompatibilidad de este líquido. Los resultados que se obtuvieron a partir de la investigación podrían ser utilizados como base para otras investigaciones que quieran depurar este tipo de líquidos.

En vista de que Chile ha planteado abordar dentro de sus políticas ambientales el desarrollo sustentable para generar un equilibrio entre el crecimiento económico y la conservación del medio ambiente, se hace indispensable introducir nuevas tecnologías y prácticas de gestión ambiental en el tratamiento de depuración e identificación de los posibles usos del LP tratado, ya que será una herramienta válida en su progreso hacia la competitividad.

## OBJETIVO

El objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar la factibilidad técnica de un sistema de tratamiento de agua, a escala piloto, basado en procesos de oxidación avanzada y adsorción, diseñado para incrementar la calidad del Líquido Percolado maduro para una posible reutilización del agua tratada.

## METODOLOGÍA

### *Área de Estudio*

La investigación experimental ha sido desarrollada en la Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, sede Coquimbo, en donde se dispuso un sistema de tratamiento a escala de planta piloto para la eliminación de contaminantes del líquido percolado proveniente del Relleno Sanitario El Panul, ubicado en la ciudad de Coquimbo, Chile (Fig. 1.). Se evaluó el potencial uso del LP después de ser sometido a distintos tratamientos POAs asociado a una adsorción con zeolita. Esta investigación se ha desarrollado gracias al financiamiento del Proyecto Fondecyt N° 11140219.



**Figura 1. Imagen satelital de instalaciones del Relleno Sanitario El Panul, Coquimbo. Fuente: Google Earth Pro. Año de imagen 2015. Fecha de captura 11/12/2015, 19:00 p.m.**

### *Evaluación de la Factibilidad Técnica del Sistemas de Tratamiento de LP*

Las muestras de LP se tomaron en un punto de sedimentación, el cual tiene un volumen de 150 L. Este punto se encuentra en el trayecto de LP desde las celdas de residuos hacia las piscinas de acumulación. Para el presente estudio, se entenderá como factibilidad técnica, la capacidad del sistema de tratamiento para reducir la concentración de DQO y Color en líquidos percolados provenientes del Relleno Sanitario El Panul.

### *Caracterización del LP*

Antes de proceder a realizar el tratamiento del LP, se caracterizaron las muestras extraídas del Relleno Sanitario El Panul. Se evaluaron varios parámetros del LP, para lo cual fue necesario realizar un análisis de: pH, DQO, amoníaco, bromo, cloro libre, color del agua, cobre y biodegradabilidad.

El pH se midió utilizando el método de vidrio-electrodo. La prueba DQO realizada en el estudio se determinó según el método EPA 410.4, usando el método colorimétrico, al combinar el análisis de la DQO con el DBO es posible conocer las condiciones tóxicas y la presencia de sustancias orgánicas biológicamente resistentes (biodegradabilidad). Además, fue necesario medir la absorbancia de la solución en un espectrofotómetro a 445 nm, usando una curva de calibración externa. El amoníaco se midió utilizando un método espectrofotométrico, basado en la norma ISO 7887. El bromo se midió utilizando el método DPD (Diethyl-p-fenildiamina). El cloro libre se midió utilizando el método EPA DPD (330.5). El color de agua se determinó utilizando Método colorimétrico Platino Cobalto, de acuerdo con el Standart Method (APHA, 2005). El cobre se medió utilizando reactivo bicinconinato, Método Ácido (HI-93702-01).

Después de la recogida, las muestras de LP se almacenaron en la oscuridad a 4 °C para mantener las características inherentes al líquido, antes de ser sometidos a procesos de adsorción y POAs.

### *Procesos de oxidación avanzada (POAs)*

Se evaluaron dos POAs para maximizar la depuración del LP. En el primero se estudió el efecto de la concentración de peróxido de hidrógeno, en presencia de UV solar y Ozono (UV solar/ O<sub>3</sub>/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), y en el segundo se estudió el efecto de la concentración del persulfato de sodio, en presencia de UV solar, Ozono y peróxido de hidrógeno (UV solar/ O<sub>3</sub>/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/ S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>).

Todas las muestras fueron sometidas a un pretratamiento de filtración utilizando un filtro de 5 µm de celulosa. Se estudió la eliminación de la materia orgánica no biodegradable para conseguir las condiciones más favorables de operación en cada caso. De esta manera, se evaluó la evolución del color y DQO que presentaba el efluente.

El sistema de tratamiento tuvo la capacidad de contener un volumen útil de 9 litros de LP, el cual presenta equipos necesarios para la depuración del agua contaminada tales como reactor solar, generador de ozono, radiómetro, termómetro, tal como se muestra en la figura 2. El fotorreactor solar está constituido un colector parabólico.





En primera instancia se evaluó el conjunto de experimentos UV solar,  $O_3$  y  $H_2O_2$ , el peróxido presentaba una pureza del 30% (Sigma Aldrich). Las muestras de LP se añadieron en distintas concentraciones; 0, 0,17, 0,34, 0,67 y 1 g/L, la radiación UV solar llegaba de forma constante y el  $O_3$  ( $3g O_3/h$ ) se burbujeo de manera continuo en todo el tratamiento. El experimento se iniciaba del medio día hasta las 15.00 horas. Se tomaron 6 muestras de 60 mL cada una, con una periodicidad de 30 minutos para luego realizar los análisis de DQO y color. De esta manera, la concentración de  $H_2O_2$  que obtuvo la mayor eliminación de los parámetros mencionados se seleccionó para un nuevo conjunto de experimentos.

La muestra que obtuvo los mejores resultados de la primera corrida fue utilizada para el segundo conjunto de experimentos evaluados, estos fueron UV solar,  $O_3$ ,  $H_2O_2$  y el radical  $S_2O_8^{2-}$ . La pureza del  $Na_2S_2O_8$  empleado fue del 99.0% (Merk), el cual se añadió a la muestra de LP en distintas concentraciones; 0, 0,01, 0,1, 1 y 5 mM. El procedimiento fue iniciado en las mismas condiciones que el experimento anterior. Se tomaron muestras de 60 mL cada 30 minutos por 3 horas para realizar las mediciones de DQO y color. El LP sometido a la concentración de  $S_2O_8^{2-}$  que obtuvo el mejor resultado en la eliminación de contaminantes se seleccionó para acoplarlo a un proceso de adsorción con Zeolita.

Con el fin de mejorar la eficiencia en el sistema de tratamiento, la muestra de LP mejor evaluada en los POAs, fue sometida a una adsorción con Zeolita Natural Clinoptilolita Mordenita granulada de Zeolita del Maule, Chile. El experimento de adsorción se realizó con un sistema de agitación con una carga de 2 L del LP, tratado junto a 1g/L de zeolita, el cual se agitó durante 2 horas a 150 rpm. Luego, se dejó decantar por 3 horas para analizar la muestra. Se realizaron mediciones de DQO y color.

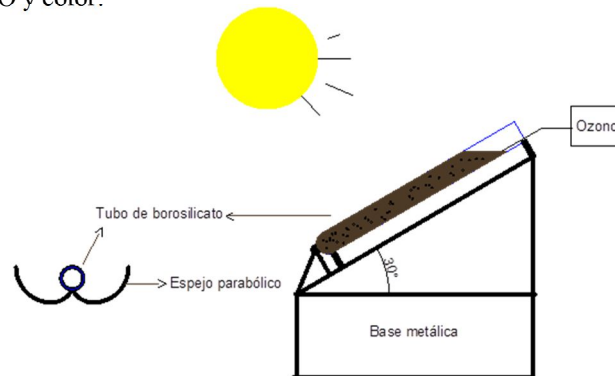


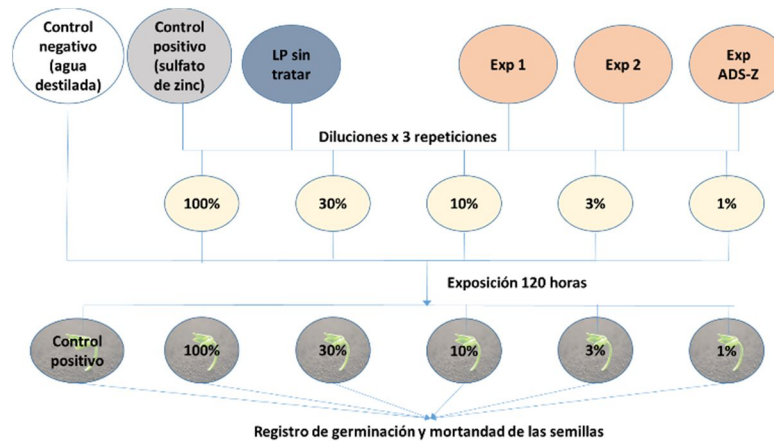
Figura 2. Sistema de tratamiento para la depuración de LP.

#### ***Evaluación de la evolución del Líquido Percolado sometido a los distintos tratamientos para determinar la factibilidad técnica del sistema.***

Los parámetros analizados en el LP fueron el pH,  $O_3$ , DQO, color, amonio total, arsénico total, vanadio total, cloruro total, boro total y el litio total. Además, se midieron parámetros ambientales como la radiación solar y temperatura de los tratamientos. La factibilidad técnica del sistema de tratamiento se pudo establecer mediante la disminución de la concentración de DQO y color.

#### ***Validación de la Toxicidad del LP Post-Tratamiento mediante Bioensayos con Semillas de Lechuga (*Lactuca Sativa*)***

Para validar la calidad del LP y determinar la reutilización del agua, se evaluó el efecto fitotóxico del LP tratado en los distintos sistemas de tratamiento estudiados, mediante un ensayo de ecotoxicidad. El ensayo se basa en una prueba de toxicidad aguda (120 horas) sobre la germinación de semillas y emergencia de la plántula de lechuga (*Lactuca sativa*) en sus primeros días de desarrollo fenológico. La metodología es descrita por Sobrero y Ronco (2004), cuyo objetivo fue evaluar los efectos de los tratamientos sobre los LP. Una de las razones para escoger la especie vegetal *Lactuca Sativa*, es debido a que, ante la presencia de una sustancia tóxica se ve alterada la supervivencia y desarrollo de la semilla y plántula (SOBRERO y RONCO, 2004). Para realizar el ensayo, se utilizó el procedimiento que se describe en el esquema de la Figura 3.



**Figura 3. Esquema de la evaluación de la toxicidad post-tratamiento. Fuente: elaboración propia.**

Para realizar el análisis, se registraron signos de fitotoxicidad - presencia de necrosis, pelos absorbentes pocos desarrollados o radículas con crecimiento irregular - y se llevó un registro de las semillas germinadas. Los resultados fueron analizados mediante el cálculo del porcentaje de inhibición en la germinación para cada una de las muestras en las diluciones; 10%, 3% y 1%, dado que a igual y mayor porcentaje de dilución generaron la mortandad de la totalidad de las semillas. Posteriormente se determinó si existían diferencias significativas entre los experimentos, mediante el test ANOVA ( $p > 0.05$ ). De esta manera, se escogió el ensayo que obtuvo el mayor porcentaje de germinación de semillas para realizar el cálculo de la concentración efectiva o de inhibición media ( $CE_{50}$ ), el cual se calculó mediante el modelo estadístico Probit para analizar bioensayos de toxicidad. Finalmente, se tomó el  $R^2$  calculado en la regresión lineal para determinar si el modelo es representativo ( $R^2 > 0,7$ ).

## RESULTADOS

### *Toxicidad y peligrosidad de LP en el medio ambiente*

El LP fue estudiado bajo las concentraciones máximas exigidas por ley, en donde se encontró (Tabla 1) que todos los parámetros tenidos en cuenta superan los límites establecido en la normativa chilena, por lo que no debería ser utilizado sin previo tratamiento en ningún tipo uso. Los datos de pH superan en un rango de 0,7 a 2,7 los exigidos por el DS90; así mismo, los datos de conductividad y de vanadio sobrepasan en más de un 100%; finalmente, los sólidos totales son mayores en un 67,2% la NCh1333.

**Tabla 1. Características del Líquido Percolado (LP) del Relleno Sanitario El Panul. Fuente: Elaboración propia.**

Parámetro	LP sin tratar	NCh 1333 (Límite máximo para agua de riego)
DQO (mg/L)	9172	-
pH	8,7	5,5 – 9
Amonio (mg/L)	1010	-
Color (PCU)	17500-16800	-
Conductividad (mS/cm)	36,20	7,5
Sólidos totales (mg/L)	836	500
Vanadio total (mg/L)	0,539	0,10
Cloruro (mg/L)	2639	200



### Factibilidad de los sistemas de tratamientos de LP propuestos

Los resultados del tratamiento 1 muestran que la concentración de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) que produce una mayor eliminación de los parámetros de interés en el tratamiento de UV/ $O_3$ / $H_2O_2$  fue la concentración de 0,67 g/L (Tabla 2), en la que se obtiene una disminución del 17,3% de DQO, y 56% de color, en un tiempo  $t_{30W}$  de 140 minutos. Por esto, se tomó en cuenta para el segundo tratamiento la concentración de 0,67 g/L de  $H_2O_2$ .

El tratamiento 2 presentó mejores resultados que el anterior, dado que el uso de dos o más oxidantes (persulfato y peróxido) permiten aprovechar los efectos sinérgicos entre ellos y potencia la degradación de la materia orgánica (MO) (Tabla 3).

La concentración óptima de  $S_2O_8^{2-}$  donde se obtuvieron mayores niveles de eliminación de MO fue de 1 mM de  $S_2O_8^{2-}$  (Tabla 3), en el que se eliminó el 28,9% de la DQO, y el 76,8% de color, requiriendo un tiempo  $t_{30W}$  de 250 minutos.

Aunque esta relación permitió obtener una alta eliminación del color, la concentración de DQO continúa siendo elevada (6500 mg/L), y por esa razón se inició un proceso de adsorción con zeolita con esta concentración, en donde se consiguió una eliminación adicional de 33%, finalizando el experimento con DQO de 4350 mg/L (Figura 4).

La adsorción con zeolita fue efectiva para eliminar completamente el amonio, y para reducir sustancias como el cadmio, plata, cloruros, boro, arsénico y litio, sin embargo, las concentraciones de algunos de estos parámetros continúan superando la normativa.

**Tabla 2. Tratamiento 1 - eliminación de color y DQO obtenidos con el tratamiento UV/ $O_3$ / $H_2O_2$  al utilizar diferentes concentraciones de  $H_2O_2$ .**

Condiciones	UV/ $O_3$ / $H_2O_2$									
	COLOR					DQO				
	0g/L	0,17g/L	0,34g/L	0,67g/L	1g/L	0g/L	0,17g/L	0,34g/L	0,67g/L	1g/L
Sin filtrar	17500	17500	17500	17500	17500	9172	9172	9172	9172	9172
filtrado	16800	16800	16800	16800	16800	9142	9142	9142	9142	9142
1h	20700	16200	15100	15500	11900	8690	8994	8861	8459	8119
1,5 h	17230	15500	14370	13300	11450	8610	8955	8660	8240	7930
2h	15400	15000	13100	12300	11000	8524	8934	8470	8104	7882
2,5 h	13400	13240	10300	10000	10670	8320	8670	8250	8038	7730
3h	12900	11700	8200	7400	10400	8207	8584	8136	7560	7631
Porcentaje de Eliminación	23,2%	30,4%	51,2%	56,0%	38,1%	10,2%	6,1%	11,0%	17,3%	16,5%

**Tabla 3. Tratamiento 2 - eliminación de color y DQO obtenidos con el tratamiento UV solar/ $O_3$ / $H_2O_2$ / $S_2O_8^{2-}$  al utilizar diferentes concentraciones de  $S_2O_8^{2-}$**

Condiciones	UVsolar/ $O_3$ / $H_2O_2$ / $S_2O_8^{2-}$							
	COLOR				DQO			
	0,01 mM	0,1 mM	1 mM	5 mM	0,01 mM	0,1 mM	1 mM	5 mM
Sin filtrar	17500	17500	17500	17500	9172	9172	9172	9172
filtrado	16800	16800	16800	16800	9142	9142	9142	9000
1h	10800	10400	9000	10000	7927	7841	8317	7600
1,5 h	9550	9230	8700	8340	8000	7600	7300	7900
2h	8400	8600	7600	7900	7900	7278	7000	7800
2,5 h	7340	8400	6600	5000	7600	7000	6700	7200
3h	6900	8100	3900	3500	7400	6990	6500	6800
Porcentaje de Eliminación	58,9%	51,8%	76,8%	79,2%	19,1%	23,5%	28,9%	24,4%

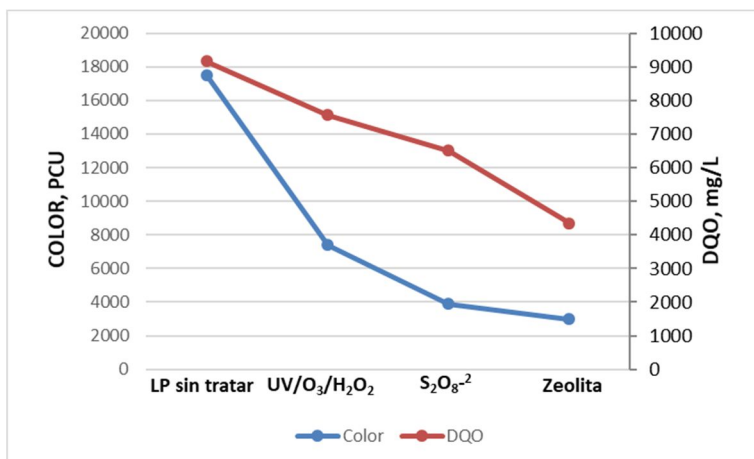


Figura 4. Proceso de eliminación de color y DQO durante los experimentos

### Efectos de la toxicidad sobre el ambiente y los organismos

A pesar de realizar tratamientos al LP para la eliminación de contaminantes, la germinación de las semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) fue baja, y presentó una mortalidad total para las concentraciones del 100%, 30% y 10% para el control negativo; el LP sin tratar, el experimento 1, el experimento 2 y la adsorción. En las concentraciones de 3% y 1% hubo diferentes porcentajes de germinación, con un 66,67% en la concentración de 1%, y un 40% en la concentración de 3% (Figura 5).

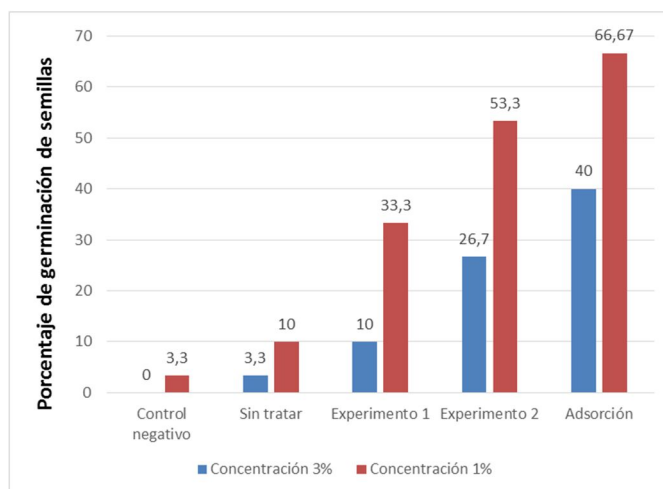


Figura 5. Porcentaje de germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) para las concentraciones del 3% y 1% en los diferentes tratamientos del estudio. El experimento 1 hace referencia a UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el experimento 2 a UV solar/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>-2</sup>.

Para determinar si existen diferencias significativas entre los experimentos, se realizó el test ANOVA con  $p > 0.05$  (Tabla 4). Se pudo establecer que existen diferencias significativas entre la germinación de las semillas a diferentes concentraciones en los experimentos ya que el valor de la probabilidad es menor a 0,05 en todos los casos.





**Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) para la germinación de semillas.**

Origen de la variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
<b>Muestra</b>	141.0	4	35.3	141.1	5.1353E-23	2.6
<b>Columnas</b>	532.3	3	177.4	709.8	1.0515E-34	2.8
<b>Dentro de los grupos</b>	65.1	12	5.4	21.8	7.8039E-14	2.0
<b>Error</b>	10	40	0.3			
<b>Total</b>	748.7	59				

Para realizar el cálculo de la  $EC_{50}$ , se tuvo en cuenta el experimento de adsorción, dado que fue el que mejores resultados presentó. Para lo anterior, se realizó el modelo estadístico Probit, en el cual se obtuvo la información de la Tabla 5 para el cálculo del  $EC_{50}$ , en donde el valor obtenido para la intercepción en la regresión ( $b$ ) fue 4,164. Así mismo el valor de ( $a$ ) fue 3,619.

**Tabla 5. Datos requeridos para calcular PROBIT en las diluciones.**

% dilución (d)	Individuos (n)	Log 10	Mortandad (r)	% Inhibición	PROBIT
10	30	1	30	100	8,09
3	30	0,47712125	18	60	5,25
1	30	0	10	33,33333333	4,5
0	30	-	0	0	0

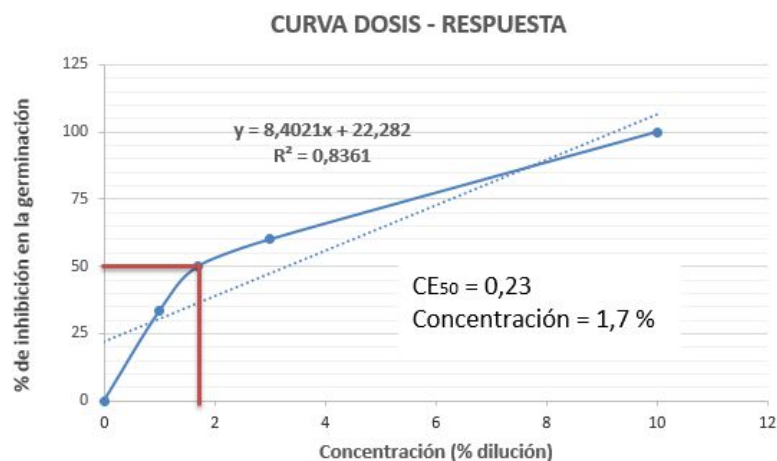
Teniendo en cuenta la anterior información, se tienen los siguientes cálculos basados en  $y = ax + b$ , donde:

$$Y = 3,619x + 4,164 \quad (18)$$

$$X = 0,2308 \quad (20)$$

$$EC_{50} = \text{Antilog } x = 1,70 \quad (21)$$

Lo anterior confirma que la dilución de 1,70% es aquella en la que sobrevive el 50% de las semillas de lechuga utilizadas para el presente estudio. Con los datos obtenidos, se realizó una curva dosis-respuesta (Figura 6), en la cual se calculó  $R^2 = 0,83$ , por lo cual se puede decir que el modelo es representativo.



**Figura 4. Curva dosis-respuesta para las diluciones y cálculo gráfico de la  $EC_{50}$ .**



### CONCLUSIONES

Los diferentes experimentos produjeron una disminución de la concentración de los parámetros estudiados, sin embargo, tanto la DQO como el color no fueron completamente reducidos, y su potencial de reuso es muy restringido, por lo que requiere de tratamientos adicionales.

El sistema de tratamiento basado en procesos de oxidación avanzada y adsorción del LP del Panul permitió establecer que, si bien existe una reducción en la concentración de los contaminantes del mismo, no fue suficiente para llegar a las establecidas por NCh 1333 para su uso en riego. Se proponen pre-tratamientos de fotocatalisis heterogénea y fitorremediación como post-tratamiento para eliminar los contaminantes que permanecen en el LP.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento recibido por Fondecyt para el desarrollo del proyecto de Iniciación en la investigación N° 11140219 titulado “Landfill leachate treatment through advanced oxidation processes coupled with biological treatment”.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. American Public Health Association (APHA). (2005). Standard methods for the examination of water and waste water, 21<sup>st</sup> edn. Washington, DC: APHA.
2. Doocey, D.J., Sharratt, P.N. (2004). Zeolite-Mediated Advanced Oxidation of Model Chlorinated Phenolic Aqueous Waste: Part 1: Aqueous Phase Fenton Catalysis, Process Safety and Environmental Protection, Volume 82, Issue 5, 352-358.
3. Du, J., Zhang, B., Li, J., Lai, B. (2020). Decontamination of heavy metal complexes by advanced oxidation processes: A review, Chinese Chem. Lett, 31, 2575–2582.
4. Foo, K.Y., Lee, L.K., Hameed, B.H. (2013). Batch adsorption of semi-aerobic landfill leachate by granular activated carbon prepared by microwave heating, Chemical Engineering Journal. 222. 259-264.
5. Hurwitz, G., Pornwongthong, P., Mahendra, S., Hoek, E. (2014). Degradation of phenol by synergistic chlorine-enhanced photo-assisted electrochemical oxidation. Chemical Engineering Journal, 240, 235–243.
6. Inoue, M., Masuda, Y., Okada, F., Sakurai, A., Takahashi, I., Sakakibara, M. (2008). Degradation of bisphenol A using sonochemical reactions, Water Research. 42.1379–1386.
7. Kulikowska, D., Klimiuk, E. (2008). The effect of landfill age on municipal leachate composition, Bioresource Technology. 99. 5981–5985.
8. Lee, Y., Von Gunten, U. (2012). Quantitative structureactivity relationships (QSARs) for the transformation of organic micropollutants during oxidative water treatment. Water Research. 46 (19), 6177-6195.
9. Liu, T., Wang, H., Hu, Z., Wei, F. (2021). Highly efficient adsorption of thiol compounds by ZSM-5 zeolites: Governing mechanisms, Microporous and Mesoporous Materials, Volume 316, 110968, ISSN 1387-1811.
10. Poblete, R., Prieto-Rodríguez, L., Oller, I., Maldonado, M., Malato, S., Otal, E., Vilches, L., Fernández-Pereira, C. (2012). Solar photocatalytic treatment of landfill leachate using a solid mineral by-product as a catalyst. Chemosphere. 88. 1090-1096.
11. Singh, K., Moody, C. M., Townsend, T. G. (2014). Ozonation pretreatment for stabilized landfill leachate high-pressure membrane treatment. Desalination. 344. 163–170.
12. Sobrero, M., Ronco, A. (2004). Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga *Lactuca sativa* L. En G. Castillo, Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. (págs. 55-67). Canadá: IDRC, IMTA.
13. Srikanth, B., Goutham, R., Badri Narayan, R., Ramprasath, A., Gopinath, K.P., Sankaranarayanan, A.R. (2017). Recent advancements in supporting materials for immobilised photocatalytic applications in waste water treatment, J. Environ. Manage, 200, 60–78.
14. Steiner, M., Wiegel, U. (2008). El libro de la basura. Una guía básica para la gestión de residuos. Proyecto Europeo Leonardo Da Vinci. Ed. Clagsa.
15. Turki, N., Belhaj, D., Jaabiri, I., Ayadi, H., Kallel, M., Bouzid, J. (2013). Determination of organic compounds in landfill leachates treated by coagulation–flocculation and fenton-adsorption. IOSR Journal of Environmental Science Toxicology. Food Technology. 7, 18–25.
16. Vicente, D. (2012). Optimización del proceso de evaporación de lixiviados en el relleno sanitario Santiago Poniente. (J. Arellano, Ed.) Universidad de Chile-Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.



17. Wang, C., Lee, P., Kumar, M., Huang, Y., Sung, S., Lin., J. (2010). Simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and denitrification (SNAD) in a full-scale landfill-leachate treatment plant. *Journal of Hazardous Materials*, 175, 622-628.
18. Xie, W.P., Qin, Y., Liang, D.M., Song, D., He, D.W. (2011). Degradation of m-xylene solution using ultrasonic irradiation, *Ultrasonic Sonochemistry*, 18, 1077–1081.