

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“EFICIENCIA DEL PROCESO DE FOTOCATÁLISIS  
HETEROGÉNEA CON  $\text{TiO}_2$  Y  $\text{H}_2\text{O}_2$  EN LA REDUCCIÓN DE  
 $\text{DBO}_5$  Y DQO DE LOS LIXIVIADOS DEL BOTADERO LA  
MEJORADA EL TAMBO HUANCAYO”**

PRESENTADO POR EL BACHILLER:  
DAVID R. GIRALDO VALENTÍN

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL  
HUANCAYO-PERÚ

2016

## DEDICATORIA

Este trabajo de investigación va dedicado a mis padres, quienes aportaron infinitamente en mi formación profesional, incentivándome día a día a conseguir mis metas y objetivos en esta vida.

## AGRADECIMIENTO

Cuando emprendimos este proyecto fue enfocado en solucionar los problemas más recientes de contaminación hídrica.

En primer propósito mis agradecimientos a los docentes de la Universidad Alas Peruanas que han podido trascender en mí la conciencia de buscar soluciones a los problemas de contaminación al ambiente en sus diferentes formas más recalcitrantes.

A mis padres y familiares que inculcaron capacidades de solución a los problemas ambientales de forma intuitiva y apasionamiento en mi formación.

A las personas que están detrás de este proyecto escondidos en el anonimato y en la penumbra del no reconocimiento que contribuyen de forma afiebrada y con el talento de buscar los cambios de paradigmas en favor de la ciencia y la investigación.

## INDICE DE CONTENIDOS

|   |      |
|---|------|
| DEDICATORIA.....                                      | ii   |
| AGRADECIMIENTO .....                                  | iii  |
| INDICE DE CONTENIDOS .....                            | iv   |
| GLOSARIO DE ABREVIATURAS.....                         | viii |
| INDICE DE TABLAS .....                                | ix   |
| INDICE DE FIGURAS .....                               | xi   |
| RESUMEN .....   | xiii |
| ABSTRACT .....  | xiv  |
| INTRODUCCIÓN .....                                    | xv   |
| CAPÍTULO I.....                                       | 17   |
| 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                     | 17   |
| 1.1 Caracterización de la realidad problemática ..... | 17   |
| 1.2 Formulación del problema.....                     | 19   |
| 1.2.1 Problema general .....                          | 19   |
| 1.2.2 Problemas específicos .....                     | 19   |
| 1.3 Objetivos .....                                   | 19   |
| 1.3.1 Objetivo general .....                          | 19   |
| 1.3.2 Objetivos específicos.....                      | 19   |
| 1.4 Justificación .....                               | 20   |
| 1.5 Importancia .....                                 | 21   |
| 1.6 Limitaciones .....                                | 22   |
| CAPÍTULO II .....                                     | 23   |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2       | FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....                                 | 23 |
| 2.1     | Marco referencial .....                                   | 23 |
| 2.1.1   | Antecedentes de la investigación .....                    | 23 |
| 2.1.2   | Referencias históricas .....                              | 26 |
| 2.2     | Marco legal .....   | 27 |
| 2.2.1   | Ley.....  | 27 |
| 2.3     | Marco conceptual.....                                     | 29 |
| 2.4     | Marco teórico .....                                       | 33 |
| 2.4.1   | Lixiviados.....   | 33 |
| 2.4.1.1 | Origen de lixiviados.....                                 | 33 |
| 2.4.1.2 | Producción de lixiviados .....                            | 34 |
| 2.4.1.3 | Composición de lixiviados.....                            | 37 |
| 2.4.1.4 | Factores que afectan a la composición del lixiviado ..... | 41 |
| 2.4.2   | Tipos de tratamiento de contaminantes líquidos .....      | 43 |
| 2.4.3   | Procesos de oxidación avanzada (POAs) .....               | 44 |
| 2.4.3.1 | Fotocatálisis heterogénea.....                            | 47 |
| 2.4.3.2 | Principio de la catálisis heterogénea.....                | 51 |
| 2.4.4   | Catalizadores.....  | 53 |
| 2.4.4.1 | Tecnologías basadas en el uso de lámparas.....            | 57 |
| 2.4.5   | Parámetros que influyen en el proceso .....               | 58 |
|         | CAPÍTULO III.....   | 63 |
| 3       | PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....                          | 63 |
| 3.1     | Metodología .....   | 63 |
| 3.1.1   | Método .....  | 63 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.1.1.1 | Ubicación geográfica .....  | 63 |
| 3.1.1.2 | Procedimiento para la toma de muestras .....                            | 64 |
| 3.1.1.3 | Preparación de compuestos del proceso foto catalítico heterogéneo ..... | 64 |
| 3.1.2   | Tipo de la investigación .....  | 65 |
| 3.1.3   | Nivel de la investigación .....   | 66 |
| 3.2     | Diseño de la investigación. ....  | 66 |
| 3.3     | Hipótesis de la investigación.....                                      | 67 |
| 3.3.1   | Hipótesis general.....  | 67 |
| 3.3.2   | Hipótesis específicas.....  | 67 |
| 3.4     | Variables .....   | 67 |
| 3.4.1   | Variable independiente.....   | 67 |
| 3.4.2   | Variable dependiente.....   | 67 |
| 3.5     | Cobertura del Estudio .....   | 68 |
| 3.5.1   | Universo .....  | 68 |
| 3.5.2   | Población.....  | 68 |
| 3.5.3   | Muestra .....   | 68 |
| 3.5.4   | Muestreo .....  | 68 |
| 3.6     | Técnicas e instrumentos .....   | 68 |
| 3.6.1   | Técnicas de la investigación.....                                       | 68 |
| 3.6.2   | Instrumentos de la investigación .....                                  | 68 |
| 3.6.3   | Fuentes .....   | 68 |
| 3.7     | Procesamiento estadístico de la información.....                        | 69 |
| 3.7.1   | Estadísticos .....  | 69 |

|                       |   |     |
|-----------------------|---|-----|
| 3.7.2                 | Representación .....                                      | 69  |
| 3.7.3                 | Técnica de comprobación de la hipótesis.....              | 69  |
| CAPITULO IV.....      |   | 70  |
| 4                     | ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... | 70  |
| 4.1                   | Resultados.....   | 70  |
| 4.1.1                 | Caracterización de los lixiviados.....                    | 70  |
| 4.1.2                 | Resultados de los experimentos.....                       | 71  |
| 4.1.3                 | Análisis económico.....                                   | 82  |
| 4.1.4                 | Balance de masa.....                                      | 83  |
| 4.2                   | Discusión de resultados .....                             | 83  |
| 4.3                   | Contrastación de Hipótesis .....                          | 100 |
| CONCLUSIONES .....    |   | 103 |
| RECOMENDACIONES ..... |   | 104 |
| BIBLIOGRAFÍA .....    |   | 105 |
| ANEXOS .....          |   | 108 |

## GLOSARIO DE ABREVIATURAS

|      |  |
|------|--|
| P    | : Precipitación                          |
| AS   | : Agua superficial                       |
| PA   | : penetración de agua subterránea        |
| Ir   | : irrigación                             |
| D    | : descomposición del residuo             |
| RLF  | : residuo líquido y fangoso              |
| E    | : evaporación                            |
| ET   | : evapotranspiración                     |
| TRH  | : escorrentía superficial                |
| I    | : infiltración                           |
| ARHs | : retención de humedad en el suelo       |
| ARHr | : retención de humedad en los residuos   |
| PEs  | : percolación en el suelo                |
| PEr  | : percolación del residuo                |
| mg/L | : miligramos por litro                   |
| SS   | : sólidos en suspensión                  |
| STD  | : solidos totales disueltos              |
| SVS  | : solidos volátiles en suspensión        |
| SDV  | : solidos volátiles disueltos            |
| DQO  | : demanda química de oxígeno             |
| DBO  | : demanda bioquímica de oxígeno          |
| SAAM | : sustancias activas al azul de metileno |
| RSU  | : residuos sólidos urbanos               |
| POAs | : procesos de oxidación avanzada         |
| TOAs | : tecnologías de oxidación avanzada      |
| mL   | : mililitros                             |



## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2.1 Características de los lixiviados jóvenes y viejos .....                                       | 38 |
| Tabla 2.2 Parámetros de muestreo de los lixiviados .....   | 38 |
| Tabla 2.3 Lista de las potencias de oxidación .....  | 45 |
| Tabla 3.1. Diseño Experimental Factorial .....   | 66 |
| Tabla 4.1 Caracterización de los lixiviados .....  | 71 |
| Tabla 4.2 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3 .....   | 71 |
| Tabla 4.3 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3 Replica .....                                       | 72 |
| Tabla 4.4 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4 .....   | 73 |
| Tabla 4.5 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4 Replica .....                                       | 73 |
| Tabla 4.6 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5 .....   | 74 |
| Tabla 4.7 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5 Replica .....                                       | 75 |
| Tabla 4.8 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3 .....   | 75 |
| Tabla 4.9 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3 Replica .....                                       | 76 |
| Tabla 4.10 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4 .....  | 76 |
| Tabla 4.11 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4 Replica .....                                      | 77 |
| Tabla 4.12 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5 .....  | 78 |
| Tabla 4.13 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5 Replica .....                                      | 78 |
| Tabla 4.14 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3 .....  | 79 |
| Tabla 4.15 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3 Replica .....                                      | 79 |
| Tabla 4.16 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4 .....  | 80 |
| Tabla 4.17 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4 Replica .....                                      | 80 |
| Tabla 4.18 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5 .....  | 81 |
| Tabla 4.19 DBO <sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5 Replica .....                                      | 82 |
| Tabla 4.20 Reduccion de DBO <sub>5</sub> y DQO con 100 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y pH 3..... | 84 |
| Tabla 4.21 Reduccion de DBO <sub>5</sub> y DQO con 100 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y pH 4..... | 85 |
| Tabla 4.22 Reduccion de DBO <sub>5</sub> y DQO con 100 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y pH 5..... | 86 |
| Tabla 4.23 Reduccion de DBO <sub>5</sub> y DQO con 200 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y pH 3..... | 90 |
| Tabla 4.24 Reduccion de DBO <sub>5</sub> y DQO con 200 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y pH 4..... | 91 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 4.25 Reduccion de DBO <sub>5</sub> y DQO con 200 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y pH 5..... | 91 |
| Tabla 4.26 Reduccion de DBO <sub>5</sub> y DQO con 300 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y pH 3..... | 94 |
| Tabla 4.27 Reduccion de DBO <sub>5</sub> y DQO con 300 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y pH 4..... | 94 |
| Tabla 4.28 Reduccion de DBO <sub>5</sub> y DQO con 300 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y pH 5..... | 95 |

## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 Factores de un balance hídrico en un vertedero .....   | 34 |
| Figura 2.2 Fases de transformación del lixiviado .....  | 40 |
| Figura 2.3 Origen de algunos de los compuestos presentes en el lixiviado .....  | 42 |
| Figura 2.4 Aplicaciones de diversas tecnologías para el tratamiento<br>de contaminantes orgánicos en aguas residuales .....   | 43 |
| Figura 2.5 Clasificación de los procesos de oxidación avanzada .....  | 46 |
| Figura 2.6 Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (AOPs).....  | 47 |
| Figura 2.7. Esquema del proceso foto catalítica durante la oxidación de<br>materia orgánica empleando O <sub>2</sub> como oxidante. Izquierda: Diagrama de<br>energía de la banda de valencia (BV) y conducción (BC) de un<br>semiconductor. Derecha: Partícula de TiO <sub>2</sub> . ..... | 49 |
| Figura 2.8. Proceso de fotocatalisis heterogénea .....  | 51 |
| Figura 2.9 Diagrama de la banda de energía de una partícula esférica de<br>dióxido de titanio b .....   | 52 |
| Figura 2.10 destino de los electrones y de los huecos dentro de una<br>partícula esférica de titanio en presencia de moléculas aceptoras (A) y (D).....   | 53 |
| Figura 2.11 destino Posición de las bandas de conducción y de<br>valencia de diferentes semiconductores junto con algunos potencial redox .....   | 54 |
| Figura 2.12 a: Celdilla unidad de la fase anatasa según la hoja patrón<br>JCPDS 84-1286. Figura 3 b: Celdilla unidad de la fase Rutilo según la<br>hoja patrón JCPDS 78-1509. ....  | 55 |
| Figura 2.13 distribución espectral de dos lámparas fluorescentes UV<br>comerciales .....  | 57 |
| Figura 4.1 Reducción de DQO con 100mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> en medio ácido de pH 3....   | 72 |
| Figura 4.2 Reducción de DQO con 100mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....  | 86 |
| Figura 4.3 Reducción de DQO con 100mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....  | 87 |
| Figura 4.4 Reducción de DBO <sub>5</sub> con 100mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....   | 88 |
| Figura 4.5 Reducción de DQO <sub>5</sub> con 100mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....   | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.6 Variación de la temperatura con 100mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                     | 89  |
| Figura 4.7 Variación de la relación DBO <sub>5</sub> /DQO con 100mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....  | 90  |
| Figura 4.8 % de Reducción de DQO con 200mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                           | 92  |
| Figura 4.9 % de Reducción de DBO <sub>5</sub> con 200mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....              | 92  |
| Figura 4.10 Variación de la relación DBO <sub>5</sub> /DQO con 100mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ..... | 93  |
| Figura 4.11 % de Reducción de DQO con 300mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                          | 96  |
| Figura 4.12 % de Reducción de DBO <sub>5</sub> con 300mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....             | 96  |
| Figura 4.13 Variación de la relación DBO <sub>5</sub> /DQO con 300mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ..... | 97  |
| Figura 4.14 % de Reducción con 100 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                                | 97  |
| Figura 4.15 % de Reducción con 200 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                                | 98  |
| Figura 4.16 % de con 300 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....  | 98  |
| Figura 4.17 % de Reducción de DBO <sub>5</sub> .....  | 99  |
| Figura 4.18 % de Reducción DQO.....   | 100 |
| Figura 4.19 Interval Plot of % de Remoción de DQO vs pH.....  | 102 |

## RESUMEN

Para la minimización de los impactos causados en los recursos hídricos por los lixiviados provenientes de los botaderos, en los últimos años se han implementado los procesos de oxidación avanzada (POA) como una alternativa tecnológicamente viable y novedosa para el tratamiento de los efluentes líquidos de dichas empresas. Los POA consisten básicamente en la formación de radicales hidróxilo altamente oxidantes, los cuales contribuyen a la mineralización total de los compuestos contaminantes presentes en los efluentes industriales. Entre los procesos más utilizados se encuentra la fotocatalisis que consiste en la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador.

La aplicación de la fotocatalisis heterogénea con luz solar confiere una mayor sostenibilidad al proceso, y es especialmente atractiva para la eliminación de efluentes que cumplen algunas características como son: carga de carbono orgánico moderada o baja, compuestos no degradables mediante métodos biológicos o convencionales, contaminantes de elevada toxicidad o la posibilidad de operar en modo discontinuo.

Se caracterizó los lixiviados del botadero “La Mejorada” obteniendo los siguientes resultados DBO<sub>5</sub> de 3859,5 mg/L; DQO de 5677,8 mg/L; dureza total 5208; alcalinidad total 7315 y pH de 8,94.

La fotocatalisis heterogénea es un proceso avanzado de oxidación que se aplica en este trabajo para determinar la Reducción de DBO y DQO, presente en los lixiviados. En el tratamiento se empleó dióxido de titanio y peróxido de Hidrogeno como catalizadores, en un equipo de prueba de jarras, y radiación UV artificial con una longitud de onda de 360 nm. La mineralización se evaluó por el parámetro de DQO. Las condiciones óptimas de tratamiento para los lixiviados son: 0,5 gramos de TiO<sub>2</sub> y un tiempo de retención hidráulica de 60 minutos, con las que se obtuvo una degradación mayor de 94,7% y una mineralización de 87,6% a las condiciones de un medio ácido de pH 4 y una concentración de 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Los resultados obtenidos muestran que el proceso de fotocatalisis heterogénea puede ser útil en el tratamiento de lixiviados.

## ABSTRACT

To minimize the impacts on water resources by leachates from landfills in recent years have implemented advanced oxidation processes (AOP) as a technologically viable and innovative alternative for the treatment of liquid effluents such Business. The POA are basically the formation of highly oxidizing hydroxyl radicals, which contribute to the total mineralization of pollutants compounds present in industrial effluents. Among the most commonly used processes is photocatalysis consisting of a photoreaction acceleration by a catalyst.

La aplicación de la fotocatalisis heterogénea con luz solar confiere una mayor sostenibilidad al proceso, y es especialmente atractiva para la eliminación de efluentes que cumplen algunas características como son: carga de carbono orgánico moderada o baja, compuestos no degradables mediante métodos biológicos o convencionales, contaminantes de elevada toxicidad o la posibilidad de operar en modo discontinuo.

Leachate from the landfill " La Mejorada " was marked with the following results DBO<sub>5</sub> of 3859,5 mg/L; DBO 5677,8 mg/L; 5208 total hardness; 8,94 of pH and total alkalinity 7315.

The heterogeneous photocatalysis is an advanced oxidation process applied in this work to determine the removal of DBO<sub>5</sub> and DQO present in the leachates. In treating titanium dioxide and hydrogen peroxide he was used as catalysts in a jar test equipment, and artificial UV radiation with a wavelength of 360 nm. Mineralization was assessed by the DQO parameter. Optimal conditions for the leachate treatment are 0,5 grams of TiO<sub>2</sub> and hydraulic retention time of 60 minutes, with a further degradation of 94,7% was obtained and mineralization conditions 87,6% an acid medium of pH 4 to a concentration of 300 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The results show that the process of heterogeneous photocatalysis can be useful in the treatment of leachates.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente un problema ambiental de importancia es la disposición final de los residuos líquidos, los cuales en su gran mayoría están siendo vertidos a los sistemas de alcantarillado sin tratamiento previo, en cuanto a la contaminación por residuos sólidos, es que son líquidos percolados o escurridos de los depósitos de almacenamiento de residuos. Estos líquidos reciben el nombre genérico de lixiviados y su importancia, en cuanto a contaminación, viene dada por su fuerte carga orgánica, la cual es fruto de su paso, con arrastre y disolución, a través de los residuos almacenados. Los lixiviados de RSU son líquidos muy contaminados, formados como consecuencia de la penetración del agua a través de la masa de residuos y por la propia descomposición de estos. Conllevan, por tanto, una gran complejidad, ya que presentan fuerte carga orgánica, altos contenidos de nitrógeno y presencia de metales pesados.

El proceso de tratamiento y/o purificación de aguas mediante fotocátalisis heterogénea con dióxido de titanio como catalizador es, hoy por hoy, una de las aplicaciones fotoquímicas que más interés ha despertado entre la comunidad científica internacional. Por un lado, la fotocátalisis heterogénea, a diferencia de la mayoría de los procesos fotoquímicos, no es selectiva y puede emplearse para tratar mezclas complejas de contaminantes. Por otro lado, la posibilidad de la utilización de la radiación solar como fuente primaria de energía, le otorga un importante y significativo valor medioambiental; Esta técnica consiste en la absorción directa o indirecta por un sólido semiconductor de fotones de luz, visible o UV. Este proceso avanzado de oxidación está definido como la aceleración de una fotorreacción mediante la presencia de un catalizador, el cual, al ser activado por la absorción de la luz, acelera el proceso e interacciona con la sustancia contaminante a través de un estado excitado o bien mediante la aparición de pares de electrón-hueco.

El objetivo de este trabajo de investigación es básicamente determinar la eficiencia de la reducción de  $\text{DBO}_5$  y DQO por el proceso de fotocátalisis heterogénea explicado anteriormente con  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  en el tratamiento de los lixiviados del

botadero “La Mejorada”, de esta manera minimizar el impacto ambiental al recurso hídrico del río Mantaro, ya que los lixiviados que proviene el botadero de “La Mejorada” son vertidos directamente a este cuerpo natural receptor.

Detallamos el presente trabajo de investigación en cuatro capítulos importantes, el primero se basa en enfocar el planteamiento del problema, las causas y razones por las cuales me motivaron a realizar este trabajo de investigación, el capítulo II enfoca los fundamentos teóricos de la investigación como los antecedentes, referencias históricas, marco legal, marco conceptual y marco teórico con respecto al proceso de fotocatalisis heterogénea, el capítulo III da a conocer el planteamiento metodológico de la investigación abarcando la metodología aplicada, el tipo y nivel de investigación a la cual corresponde, diseño e hipótesis, variables, la cobertura de estudio, técnicas de instrumentos que se utilizaron, finalmente el capítulo IV muestra la organización, presentación y los análisis de los resultados obtenidos en todo el proceso.



## **CAPÍTULO I**

### **1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Caracterización de la realidad problemática**

Los rellenos sanitarios, hace unas décadas pasadas fue denominada como una solución para el problema de los residuos domiciliarios e industriales, hoy en día se han convertido, en un nuevo problema que urge de una atención profunda sobre cuáles deberían ser las verdaderas estrategias para encarar la gestión de los desechos sólidos una vez dispuestos los residuos sólidos, es necesario minimizar los impactos de esta práctica. Uno de los subproductos generados de dicha mezcla de basura se convierte en un fluido que se denomina: lixiviado, el cual se clasifica de acuerdo al tiempo de vida del mismo, y cuya composición es difícil de establecer como tal, pues esta dependerá de la combinación de las cantidades de uno u otro residuo contenidos en determinado lote de desechos, el agua que entra en contacto a través de los estratos y los que se generan por liberación del exceso de agua de los residuos sólidos en fase de descomposición, arrastrando a su paso material disuelto, en suspensión, fijo o volátiles lo que hace la carga orgánicas que originalmente estaban dentro del residuo siendo uno de los contaminantes más peligrosos. De no

recogerse adecuadamente y luego tratarse, puede contaminar aguas subterráneas, superficiales y suelo. Por esta razón, y para evitar que esto puede suceder, los rellenos sanitarios se impermeabilizan, se drenan apropiadamente y los lixiviados colectados por estos drenes, deben ser tratados ya que existen numerosos reportes de impacto negativo que estos provocan (Droste, 1997).

Los residuos sólidos tratados inadecuadamente en el botadero “La Mejorada”, generan serios riesgos para la salud y en época de lluvia estas son arrastradas hacia el río Mantaro afectando la composición física química y biológica del recurso hídrico en este, la presencia de estos lixiviados presentan una alta toxicidad, compleja composición orgánica elevando los valores límites máximos permisibles de DBO<sub>5</sub> y DQO, hasta la actualidad la Municipalidad Distrital de El Tambo no implementa una tecnología apropiada que permita reducir eficientemente la población de materia orgánica, materia inorgánica, todas estas demandantes del oxígeno disuelto

Los procesos avanzados de fotocatalisis, han sido propuestos en los últimos años como alternativas eficientes en la depuración de suelos y agua contaminados, con resultados realmente interesantes. (CISTERNA, 2003). La presencia de compuesto tóxico y recalcitrantes supone un importante problema para los tratamientos biológicos convencionales, además, en los últimos años, la aparición de los denominados “contaminantes emergentes” tales como pesticidas, fármacos, etc. Genera un problema adicional debido a la escasa información disponible sobre sus efectos en el ambiente.

Una alternativa viable, efectiva que puede implementar la municipalidad Distrital de El Tambo como pre o post tratamiento biológico, es la aplicación de un proceso avanzado de oxidación fundamentado en el proceso fotocatalítico heterogénea para el tratamiento de efluentes líquidos de los rellenos sanitarios y botaderos.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿En qué medida la eficiente aplicación del proceso de fotocátalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  permitirá reducir el alto índice de toxicidad,  $\text{DBO}_5$  y  $\text{DQO}$  de los lixiviados del botadero la Mejorada?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- ¿Qué características fisicoquímicas se encuentran presente en lixiviados del botadero la Mejorada?
- ¿Cuál es el efecto de la dosificación del catalizador  $\text{TiO}_2$  en combinación con  $\text{H}_2\text{O}_2$  en medios ácidos en la reducción de materia orgánica en un proceso de fotocátalisis heterogénea de los lixiviados del botadero la Mejorada?
- ¿Cuál es la reducción de  $\text{DBO}_5$  y  $\text{DQO}$  en el lixiviado mediante el proceso de fotocátalisis heterogénea de los lixiviados del botadero la Mejorada?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar la eficiencia de la aplicación del proceso de fotocátalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  que permitirá reducir el alto índice de toxicidad,  $\text{DBO}_5$  y  $\text{DQO}$  de los lixiviados del botadero la Mejorada.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar las características fisicoquímicas se encuentran presente en los lixiviados del botadero la Mejorada.
- Evaluar el efecto de la dosificación del catalizador  $\text{TiO}_2$  en combinación con  $\text{H}_2\text{O}_2$  en medios ácidos en la reducción de materia orgánica en un proceso de fotocátalisis heterogénea de los lixiviados del botadero la Mejorada.

- Determinar la reducción de la DBO<sub>5</sub> y DQO en el lixiviado mediante el proceso de fotocatalisis heterogénea de los lixiviados en el botadero la Mejorada.

#### **1.4 Justificación**

Los residuos sólidos tratados inadecuadamente en el botadero “La Mejorada”, generan serios riesgos para la salud que se incrementan en época de lluvia, estos líquidos son arrastrados hacia el río Mantaro afectando de esta manera la composición física química y biológica de este recurso hídrico, estos se caracterizan por presentar una alta toxicidad, compleja composición orgánica elevando los valores límites máximos permisibles de DBO<sub>5</sub> y DQO, la composición tan variada de esta solución va representar un foco de contaminación sumamente peligroso porque fluye generalmente al suelo, dejando un camino de contaminación de suelo y agua y si tomamos en cuenta que generalmente esa agua se utiliza para el riego de sembríos e ingesta de animales como ovinos y porcinos que se encuentran por la zona afectada, la contaminación se multiplica, por ello es sumamente importante evitarlo y tratar estos lixiviados eliminando cualquier posibilidad de contaminación del entorno y de la sociedad, hasta la actualidad la Municipalidad Distrital de El Tambo no implementa una tecnología apropiada que permita reducir eficientemente la población de materia orgánica e inorgánica presentes en estos fluidos.

Este trabajo de investigación da a conocer una alternativa de solución para los efluentes de estos lixiviados, teniendo en cuenta que en nuestro país son pocos los rellenos sanitarios que se proponen en el tratamiento de estas aguas para reutilizarlas en algún otro punto del proceso o bien para utilizarlas como agua de riego, etc. Por tal motivo planteo el proceso foto catalítico heterogéneo como una tecnología apta y eficiente para el tratamiento de estas aguas, principalmente con vistas a su reutilización posterior y para llevar a cabo los experimentos requeridos, utilicé las instalaciones

experimentales de la escuela profesional de ingeniería ambiental de la Universidad Alas Peruanas, y fue necesario desarrollar también las técnicas de análisis para la caracterización del seguimiento de los parámetros a lo largo de los diferentes ensayos realizados. Con la finalidad de que los resultados obtenidos en todo el proceso sean positivos, de esta manera contribuir a la sociedad con este aporte aplicativo para la minimización de impactos negativos ocasionados por los lixiviados que genera el botadero la Mejorada.

### **1.5 Importancia**

Como se puede observar, el tratamiento de los lixiviados de los rellenos sanitarios es un problema difícil de atacar, tal vez, sin exageración, uno de los problemas más desafiantes, cualquier actividad antropogénica conlleva la generación de residuos sólidos “basura”, los cuales si no son reincorporados a los procesos productivos, generalmente terminan en lugares conocidos como sitios de disposición final. De acuerdo con las prácticas que se presentan en la Región, estos sitios pueden clasificarse de la siguiente manera; relleno sanitario, vertidos a cuerpos de agua y vertidos en el terreno. Obviamente que estas dos últimas no constituyen los mejores métodos para disponer la basura, sin embargo y desafortunadamente, son los más socorridos tanto a nivel nacional y regional. Es en estos lugares de acumulación de basura, donde se desprende un líquido que provoca una de las mayores afectaciones al ambiente, y es conocido propiamente con el termino de lixiviado. Este líquido proviene de desechos muy heterogéneos en composición y arrastra todo tipo de contaminantes muchos de ellos en concentraciones elevadas, por lo que es catalogado como uno de los más complejos y difíciles de tratar al contener concentraciones elevadas de contaminantes orgánicos e inorgánicos incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal y metales pesados, además de sales inorgánicas.

Por lo anterior, es de suma importancia la recolección y el tratamiento adecuado de dichos lixiviados. Se han llevado a cabo investigaciones sobre lixiviados que han sido enfocadas al uso de procesos de oxidación avanzada, por ejemplo, ozono,  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ ,  $\text{TiO}_2$  con el proceso de conocido con fotocátalisis heterogénea (Roger Iván Méndez Novelo, 2010).

## **1.6 Limitaciones**

La limitación para el presente trabajo, es que no existe información de la aplicación del proceso de fotocátalisis heterogénea para el tratamiento de lixiviados generados por los rellenos sanitarios y/o botaderos.

## **CAPÍTULO II**

### **2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.1 Marco referencial**

##### **2.1.1 Antecedentes de la investigación**

Según LA FOTOCATÁLISIS: ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA LA BUENA REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES (internacional). Trabajo realizado por (Jaramillo Páez & Taborda Ocampo, 2006). La fotocatalisis ha sido muy estudiada en los últimos 25 años gracias a su versatilidad en la utilización como un proceso de degradación de contaminantes, debido a las regulaciones cada vez más estrictas, que son el reflejo de la sociedad por la preocupación de mantener su medio limpio de contaminantes. El proceso de fotocatalisis se basa en la transferencia de carga a través de la interfaz entre el semiconductor y la solución acuosa contaminada. El proceso de fotocatalisis se basa en la transferencia de carga a través de la interfaz entre el semiconductor y la solución acuosa contaminada. En la interfaz de estos dos componentes se da una redistribución, lo cual se extiende significativamente en ambos lados. En la fotocatalisis se necesita la presencia de un semiconductor, en el cual la conductividad aumenta

con la temperatura, pero esta es menor que en los metales. Uno de los aspectos más relevantes es la generación del par electrón-hueco que es el principio por el cual se fundamenta la fotocatalisis, ya que por este modelo se explica la absorción de los fotones y la distribución de diferentes estados electrónicos en la superficie, y gracias a este fenómeno se puede dar la degradación de moléculas orgánicas, colorantes y metales como cadmio, níquel, mercurio, cobre, cromo.

Según EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO FOTOCATALÍTICO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EMPLEANDO ENERGÍA SOLAR (internacional) el trabajo realizado (Rios & Felipe Montoya, 2008). En este trabajo se evalúan la degradación foto catalítica de contaminantes acuosos provenientes de una industria de productos químicos, empleando un motorreactor solar de placas planas de vidrio corrugado dispuestas en forma de cascada, sobre las cuales se soportaron películas de  $\text{TiO}_2$  (Degussa P-25) /  $\text{SiO}_2$ , como sistema fotoactivo. Se estudió la influencia de tres variables en la eficiencia de descontaminación: cantidad de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , volumen que trataron y cantidad de  $\text{TiO}_2$  disperso, mediante un diseño de experimentos llevados a cabo en modo de operación discontinua por un periodo de 5 horas para cada ensayo. Los resultados obtenidos confirman a la Fotocatalisis Heterogénea (FH) como una tecnología viable de tratamiento en etapas previas a un tratamiento biológico ya que se alcanzaron porcentajes de reducción en la DQO que varían entre 6% y 46% y se obtuvieron efluentes biodegradables en todas las pruebas realizadas.

En la investigación APLICACIÓN DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA SOLAR PARA LA DEGRADACIÓN DE RESIDUOS FARMACÉUTICOS EN EFLUENTES (Internacional) realizado por



(Narváez Campo , 2012) en el estudio, se aplicó fotocátalisis heterogénea solar con  $\text{TiO}_2$ , en un reactor colector parabólico compuesto (CPC), para degradar Acetaminofén de 40 ppm de TOC, Albendazol de 40 ppm de TOC y Dicloxacilina de 25 ppm de TOC. Además se analizó la influencia del pH inicial (5 y 9) y concentración de catalizador (0,3 g/L y 0,6 g/L) en la degradación de cada fármaco. El proceso se realizó, con dos niveles de radiación acumulada, 19,14 y 38,28  $\text{Wh/m}^2$ . Los mayores porcentajes de degradación de cada fármaco fueron: 48,85; 30,27 y 45,82; respectivamente. Para determinar la concentración y degradación de los fármacos, se midió el Carbono Orgánico Total (TOC), al igual que los espectros UV. El estudio del efecto del pH inicial y concentración de catalizador, se realizó con el análisis señal/ruido del método experimental de Taguchi. Además se determinaron las mejores condiciones de degradación para cada fármaco Acetaminofén, pH inicial 9 y  $[\text{TiO}_2] = 0,6 \text{ g/L}$ . Albendazol, pH inicial 5 y  $[\text{TiO}_2] = 0,6 \text{ g/L}$ . y Dicloxacilina pH inicial 5 y  $[\text{TiO}_2] = 0,3 \text{ g/L}$ .

Según el tratamiento de investigación TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR OXIDACIÓN FENTON (nacional) realizado por (Roger Iván Méndez Novelo, 2010), Los lixiviados son el resultado de la percolación de líquidos a través de los desechos sólidos en proceso de estabilización. La complejidad del tratamiento de los lixiviados se deriva de que su composición es altamente tóxica y variable y debido al suelo altamente permeable de la península de Yucatán, México representan un peligro alto para la salud. Se presentan los resultados de aplicar el proceso Fenton a los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Mérida. El proceso Fenton consiste en tratar la carga contaminante con una combinación de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{FeSO}_4$  en condiciones ácidos. Se determinaron el tiempo óptimo de reacción, los valores

óptimos de pH y dosis de reactivo Fenton, así como las dosis óptimas para el postratamiento coagulación floculación. Las condiciones y dosis óptimas del proceso de oxidación fueron: tiempo de contacto de 20 minutos, un valor de pH igual a 4, concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 600 mg/l y Fe<sup>2\*</sup> de 1,000 mg/L. Los porcentajes de Reducción promedio de materia orgánica, medida como DQO,, fue de 78%, y medida como COT, del 87%.

### **2.1.2 Referencias históricas**

El avance en las investigaciones sobre el efecto de los contaminantes en las formas de vida y su incidencia en los ecosistemas, sumado a la demanda de la sociedad por aguas de mejor calidad, se han materializado en regulaciones cada vez más estrictas frente a la disposición de los contaminantes en fuentes de agua. En las últimas tres décadas, la legislación ambiental mundial se ha centrado en exigir la protección de los cuerpos de agua dulce, dada la escasez de la misma.

Dentro de los contaminantes hídricos, los lixiviados constituyen un contaminante indeseable (OMS. 1994), pues éstos le confieren al agua características organolépticas desagradables y nocivas para la salud humana, entre otros problemas (Pirkanniemi & Sillanpaa , 2002). Por ello la legislación mundial, y particularmente la Legislación Peruana, es bastante estricta con las concentraciones permitidas de dicho contaminante en las aguas vertidas. (Kang , Chaplin, & Glase, 1987)

Una de las técnicas estudiadas actualmente para la Reducción de lixiviados en la fotocatalisis heterogénea, la cual ha sido estudiada desde 1976, pero sólo hasta mediados de los años 80 se plantea la posibilidad de aplicar estos procesos al tratamiento de lixiviados.

Se ha encontrado que la fotocatalisis heterogénea puede aplicarse principalmente cuando: la concentración de los contaminantes es alta o media, hasta unos pocos miles de ppm, los contaminantes no son biodegradables, se requiere degradar mezclas complejas, pues se aprovecha su característica de escasa o nula selectividad y, en general si los métodos convencionales son insuficientes o costosos. Aunque una de las primeras referencias que menciona el término fotocatalisis data del año 1910, el desarrollo de la fotocatalisis heterogénea se produjo tras la publicación del trabajo de Honda y Fujishima en 1972, que despertó en la comunidad científica un enorme interés. El número de publicaciones relativas a la fotocatalisis no ha parado de aumentar año tras año a partir de los años 90, destaca la evolución exponencial del número de publicaciones sobre fotocatalisis a partir del año 2000, lo que prueba la tendencia general y el gran interés de la comunidad científica en este campo, con más de 2000 contribuciones en el último año (Hontoria, 2000).

## **2.2 Marco legal**

### **2.2.1 Ley**

**Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos. DECRETO SUPREMO N° 057-2004-PCM**

#### **Capítulo IV Infraestructura de Disposición Final**

**Artículo 85°.** - **Instalaciones mínimas en un relleno sanitario.** Las instalaciones mínimas y complementarias que debe poseer un relleno sanitario son: 1. Impermeabilización de la base y los taludes del relleno para evitar la contaminación ambiental por lixiviados ( $k \leq 1 \times 10^{-6}$  y una profundidad mínima de 0.40 m) salvo que se cuente con una barrera geológica natural para dichos fines, lo cual estará sustentado técnicamente; 2. Drenes de lixiviados con planta de tratamiento o sistema de recirculación interna de los mismos; 3. Drenes y

chimeneas de evacuación y control de gases; 4. Canales perimétricos de intersección y evacuación de aguas de escorrentía superficial; 5. Barrera sanitaria; 6. Pozos para el monitoreo del agua subterránea a menos que la autoridad competente no lo indique, teniendo a vista el sustento técnico; 7. Sistemas de monitoreo y control de gases y lixiviados; 11. Otras instalaciones mencionadas en el Reglamento y normas vigentes.

## **LEY N° 28611.- LEY GENERAL DEL AMBIENTE**

### **“Artículo 121°.- Del vertimiento de aguas residuales**

El Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes.”

### **Artículo 122°.- Del tratamiento de residuos líquidos.**

**122.3** Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con lo establecido en las normas legales vigentes.

Ley N° 29158, Ley Orgánica del Poder ejecutivo, que aprobó los Límites Máximos Permisibles para Efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. La Ley de Recursos Hídricos N° 29338 / 01-04-2009, en su artículo 79°, establece que la Autoridad Nacional del Agua autoriza el vertimiento

del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marino, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-agua) y Límites Máximos Permisibles (LMP). Ley General de Residuos Sólidos; Ley N°27314 artículo 4° enmarca la política nacional ambiental el programa agenda 21 – capítulo 21 desechos sólidos: a) reducción al mínimo de los desechos. c) promoción y eliminación y el tratamiento ecológicamente racional de los desechos

### 2.3 Marco conceptual

- **Absorción:** Fijación y concentración selectiva de sólidos disueltos en el interior de un material sólido, por difusión.
- **Adsorción:** Fenómeno fisicoquímico que consiste en la fijación de sustancias gaseosas, líquidas o moléculas libres disueltas en la superficie de un sólido.
- **Afluente:** Agua u otro líquido que ingresa a un reservorio, planta de tratamiento o proceso de tratamiento.
- **Agua residual:** Agua que ha sido usada por una comunidad o industria y que contiene material orgánico o inorgánico disuelto o en suspensión.
- **Biodegradabilidad:** Es la descomposición aeróbica o aerobia de un material por acción enzimática de microorganismos tales como bacterias, hongos y algas bajo condiciones normales. Propiedad que tiene las sustancias de reintegrarse con mayor facilidad a la tierra por acción de la naturaleza. Nota todas las sustancias son biodegradables, ya que dependen de su composición física y química y de varios factores, principalmente de la estabilidad que presenten sus moléculas y del medio en que se encuentran que les permita estar biodisponible para los agentes biológicos y de las enzimas de dicho agente.

- **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO):** Es la cantidad de oxígeno consumido en la degradación bioquímica de la materia orgánica mediante procesos biológicos aerobios. Existen distintas variables de la determinación de la DBO, entre las que se refieren al periodo de incubación. La más frecuente es la determinación de DBO a los cinco días ( $DBO_5$ ).
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica e inorgánica cualquiera sea su origen. También se define como cantidad de oxígeno para la oxidación de la materia orgánica a partir de un oxidante químico fuerte.
- **Espectrofotometría UV-Vis:** En primer lugar destaca el uso de la espectrofotometría UV-Vis. Las principales ventajas de los analizadores continuos basados en esta técnica son la sencillez en su operación, robustez y costo reducido del instrumento analítico, un tiempo de respuesta rápido del detector, así como la posibilidad de efectuar análisis cualitativo y cuantitativo. Sus desventajas son su baja selectividad (múltiples especies químicas absorben radiación en las mismas regiones espectrales), así como una limitada sensibilidad (el rango de concentraciones detectado está en el orden de los  $mg\ L^{-1}$ , en general).
- **Fotocatálisis heterogénea:** Catálisis heterogénea tiene el catalizador en una fase diferente de los reactivos. Fotocatálisis heterogénea es una disciplina que incluye una gran variedad de reacciones: oxidaciones leves o totales, deshidrogenación, la transferencia de hidrógeno,  $18\ O_2 - 16\ O_2$  y el intercambio isotópico de deuterio-alcano, la deposición de metal, la desintoxicación del agua, la eliminación de contaminantes gaseosos. Photocatalysts heterogéneos más comunes son los semiconductores, que tienen características únicas. A diferencia de los metales que tienen un continuo de estados electrónicos, semiconductores poseen una región de energía nula donde no hay niveles de energía están disponibles para promover la recombinación de un electrón y el agujero producido por foto

activación en el sólido. La región de vacío, que se extiende desde la parte superior de la banda de valencia llena a la parte inferior de la banda de conducción vacante, se llama la banda prohibida. Cuando la luz incide en estos semiconductores, la presente electrón en la banda de valencia salta a la banda de conducción, a consecuencia de los cuales es la generación de un agujero positivo.

- **Fotocatálisis homogénea:** En la fotocatalisis homogénea, existen los reactivos y foto catalizadores en la misma fase. Los foto catalizadores homogéneos más comúnmente usados incluyen, ozono, óxido de metal de transición y los sistemas de foto-Fenton. La especie reactiva es el OH que se utiliza para diferentes propósitos. El mecanismo de producción de radicales hidroxilo por el ozono puede seguir dos caminos.
- **Lixiviado Joven:** Son los lixiviados de las áreas de los rellenos sanitarios que han sido recientemente rellenos y producen un lixiviado altamente contaminante.
- **Lixiviado Maduro:** Son los lixiviados de las áreas de los rellenos sanitarios con una edad de uno a dos años.
- **Lixiviado Viejo:** Son los lixiviados de las áreas de los rellenos sanitarios con una edad superior a cinco años.
- **Lixiviado:** Es un líquido producido fundamentalmente por la precipitación pluvial que se infiltra a través del material de cobertura que atraviesa las capas de basura de un relleno sanitario , transportando concentraciones apreciables de material orgánica en descomposición y otros contaminantes .Es de color pardo grisáceo cuando es joven y negro y viscoso cuando es maduro .Otros factores que contribuyen a la generación de lixiviados son el contenido de humedad propio de los desechos, el agua de la descomposición y la infiltración de aguas subterráneas .La composición de los lixiviados varía mucho de acuerdo con el tipo de residuo , las precipitaciones en el área , las velocidades de

descomposición química y otras condiciones del lugar , pero todos coinciden en que posee una alta carga orgánica.

- **Muestra compuesta:** Mezcla de varias muestras instantáneas recolectadas en el mismo punto de muestreo en diferentes tiempos. La mezcla se hace sin tener en cuenta el caudal en el momento de la toma.
- **Oxidación:** conversión de materia orgánica en formas más simples y estables con liberación de energía. Esto se puede lograr con medios químicos o biológicos. Adición de oxígeno a un compuesto.
- **Relleno sanitario:** Es una instalación destinada a las disposición y ambientalmente segura de los residuos sólidos en la superficie o bajo tierra , basados en los principios y métodos de la ingeniería sanitaria ambiental .Para construir un relleno sanitario es importante seleccionar el terreno , que reúna condiciones técnicas adecuadas como son : topografía , nivel a que se encuentran las aguas subterráneas y disponibilidad para la cobertura de los residuos sólidos .De acuerdo con las características del terreno , el relleno sanitario puede construir siguiendo los métodos de área , zanja o una combinación de ambos métodos .(Guía de diseño construcción , operación , mantenimiento y cierre de relleno sanitario manual , MINAN –Perú).
- **Semiconductores:** Los SCs constituyen una gran variedad de materiales cuya conductividad eléctrica es marcadamente menor que la de los metales y aumenta con la temperatura.  $\text{TiO}_2$  y Reactores Fotoquímicos, El dióxido de titanio, en la forma anatasa, es el foto catalizador más usado en fase heterogénea, debido a que no es tóxico, es estable a la foto corrosión, de bajo costo, así como puede activarse con radiación UV ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) proveniente de lámparas o del sol. Particularmente, la presentación comercial Degussa P25 es el producto más empleado con estos fines, debido fundamentalmente a su estabilidad química, actividad y reproducibilidad; está compuesto aproximadamente de 25% de rutilo y 75% de anatasa, formas alotrópicas del mismo óxido.



- **Sustancia recalcitrante:** Son todas aquellas sustancias cuya persistencia en el medio ambiente es muy larga debido a su difícil biodegradación esto porque en su composición química existe sustituyentes extraños (cloro u otros halógenos), enlaces inusuales, anillos aromáticos muy condensados o excesivos tamaños moleculares, por lo que su asimilación biológica es muy lenta y muchos de ellos tienen acumulación que pueden ocasionar serios riesgos de contaminación.
- **Tiempo de Retención Hidráulico:** tiempo medio que se demoran las partículas de agua en un proceso de tratamiento. Usualmente se expresa como la razón entre el caudal y el volumen útil.

## 2.4 Marco teórico

### 2.4.1 Lixiviados

Se puede definir el lixiviado como el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos en descomposición y que extrae materiales disueltos o en suspensión, el lixiviado está formado por el líquido que entra en el vertedero desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos). (Herry R, 2000)

Los lixiviados se caracterizan por ser líquidos de un color muy oscuro, mal olor y altas cargas contaminantes, son difíciles de tratar y más cuando se trata de lixiviados viejos o parcialmente estabilizados, pues poseen compuestos recalcitrantes que son difíciles de degradar. (Andrés M. , 2001)

#### 2.4.1.1 Origen de lixiviados

El origen de estos líquidos contaminados puede atribuirse a muchos factores, incluyendo el líquido producido en la descomposición de los residuos o el extraído por presión de los residuos almacenados. Sin embargo, las principales contribuciones son las fuentes de aguas tanto subterráneas como superficiales como precipitación, escorrentías, así como la disposición de líquidos y fangosos. (Andrés M. , 2001) Al

filtrarse el agua a través de los residuos sólidos en desee lixivian en solución materiales biológicos y constituyentes químicos. (Andrés M. , 2001)

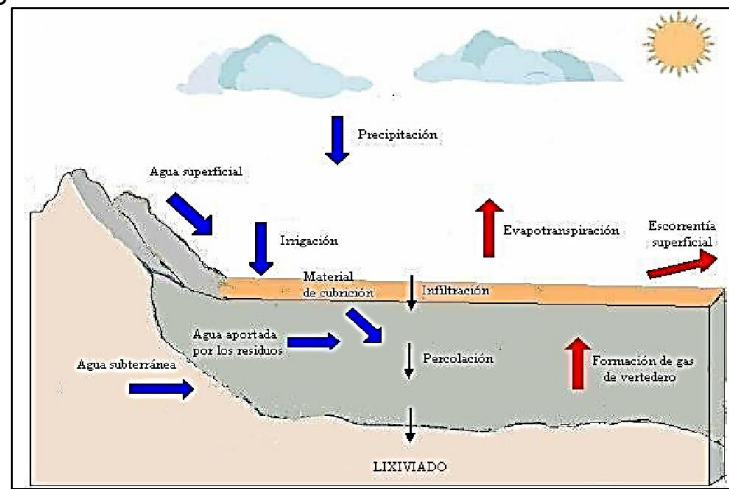
#### 2.4.1.2 Producción de lixiviados

El potencial de formación del lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hidrológico del vertedero. El balance hidrológico implica la suma de todas las cantidades de agua que entran en el vertedero y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material en el vertedero. (Andrés M. , 2001)

De forma general se pueden agrupar los distintos factores condicionantes de la producción de lixiviados en cuatro grupos:

- Entradas de agua.
- Condiciones de la superficie del depósito.
- Condiciones de suelo
- Condiciones de residuos

Figura 2.1 Factores de un balance hídrico en un vertedero



(Bueno, 1997)

A continuación, se analizan brevemente los diferentes factores:

**a) Precipitación (P).**

En la mayoría de las ocasiones, representa la principal fuente de lixiviados. Hay cuatro características de la precipitación que influyen en la generación de lixiviados: cantidad, intensidad, frecuencia, y duración de la misma. (Primo, 2008)

**b) Agua Superficial (AS)**

Representa el agua que puede aportarse a través de la superficie teniendo su origen en la escorrentía superficial de las zonas adyacentes, y en la misma influyen distintos factores: topografía de la superficie, material de cubrición, vegetación, permeabilidad y humedad del suelo. Siendo probablemente la pendiente superficial el factor determinante.

**c) Penetración de agua subterránea (PA)**

Corresponde a la entrada de aguas subterráneas en el depósito. Tiene lugar cuando el depósito está situado a una cota inferior a la del nivel freático del terreno circundante. (Primo, 2008)

**d) Irrigación (Ir)**

Tiene lugar cuando sobre la superficie del depósito se extienden aguas, generalmente lixiviados, con el fin de reducir el volumen de los lixiviados.

**e) Descomposición del residuo (D)**

En los RSU existe un cierto volumen de lixiviados generado por la descomposición de los propios residuos, que si bien, en la cantidad aportada no es importante, es decisiva en la caracterización química de los lixiviados.

**f) Residuos líquidos y fangosos (RLF)**

El aporte de este tipo de residuos se minimiza impidiendo la deposición de residuos muy líquidos colocando los mismos cerca de

otros que permitan la impregnación y por tanto la retención del líquido.  
(Roger Iván Méndez Novelo, 2010)

### **g) Evaporación (E) y Evapotranspiración (ET).**

Es la liberación de agua a la atmósfera por dos procesos: evaporación y transpiración. En una superficie libre de agua, la tasa de evaporación depende de las presiones de vapor de agua y del aire circundante. A su vez, ambas presiones de vapor están afectadas por: temperatura del aire y del agua, intensidad del viento, humedad, presión atmosférica, naturaleza y pendiente de la superficie. En la transpiración, además de los factores ambientales físicos influyen los factores fisiológicos, característicos de la vegetación. En la evapotranspiración se deben diferenciar dos acepciones: (Andrés M. , 2001)

- Evaporación potencial

Es la que tendría lugar si el suelo suministrase en todo momento el agua suficiente.

- Evaporación real

Es la pérdida de agua teniendo en cuenta la cantidad real de agua disponible para las plantas.

### **h) Escorrentía superficial (ES)**

Representa el agua que circula por la superficie del depósito, en la misma influyen factores similares a los de la escorrentía de las aguas superficiales, solamente que referidos al propio depósito, también han de considerarse los drenajes superficiales. Los factores más importantes que influyen en ella son el material de cubrición y la pendiente superficial del depósito.

### **i) Infiltración (I)**

Representa el volumen global de agua que penetra a través de la superficie del suelo (material de cubrición). Está afectada por la evapotranspiración y la escorrentía superficial, así como por la

humedad del material de cubrición: si la humedad disminuye la infiltración aumenta. También influye la humedad del residuo, cuando el mismo no está saturado la tasa de infiltración viene regulada por la permeabilidad de las capas superiores: cuando están saturadas la infiltración viene regulada por la capa de menor permeabilidad. (Primo, 2008)

**j) Retención de la humedad (ARHs y ARHr)**

Representa el contenido máximo de humedad que un suelo (ARHs) o un residuo (ARHr) puede retener en un campo gravitacional sin que tenga lugar escape de agua de la masa sólida.

**k) Percolación (PEs y PEr)**

Es la cantidad de agua que excede la capacidad de campo, contenido máximo de humedad, que para un suelo (PEs) o para un residuo (PEr) escapa de la masa sólida. Generalmente, el volumen de lixiviados coincide con el volumen de percolación. (Roger Iván Méndez Novelo, 2010)

**2.4.1.3 Composición de lixiviados**

De forma simple los lixiviados se generan por descomposición de los residuos y por el agua de lluvia que se infiltra a través de los mismos. Esta lluvia caída sobre la masa de residuos percola a través de los mismos, disolviendo y arrastrando a su paso diversos elementos contaminantes. Estas concentraciones tienen importantes implicaciones para la operatividad y el rendimiento de los procesos de tratamiento, y debe tenerse cautela cuando se busque hacer la adaptación de las tecnologías a los casos locales.

Por lo que, la composición de los lixiviados vendrá dada fundamentalmente por los contaminantes que el residuo contiene, y su concentración se relaciona con la capacidad que existe una buena correlación entre la concentración de lixiviados y el volumen total producido. (Heng, Nikraz, & Tse Hung, 2010)

Tabla 2.1 Características de los lixiviados jóvenes y viejos

| <b>Característica</b>                               | <b>Lixiviado Joven<br/>menos de 2/5 años)</b> | <b>Lixiviado Viejo<br/>Mayor de 2/5 años)</b> |
|---|---|---|
| Demanda química oxígeno (mg L <sup>-1</sup> )       | 3641,2  | 875,4   |
| Demanda bioquímica de oxígeno (mg L <sup>-1</sup> ) | 2031,6  | 195,8   |
| Carbono orgánico disuelto (mg L <sup>-1</sup> )     | 1240  | 290,3   |
| PH  | 6,52  | 5,72  |
| Amonio (mg L <sup>-1</sup> )                        | 288,6   | 260,0   |
| Nitrito (mg L <sup>-1</sup> )                       | 1,8   | 0,72  |
| Nitrato (mg L <sup>-1</sup> )                       | 1,8   | 0,73  |
| Nitrógeno total (mg L <sup>-1</sup> )               | 474,8   | 304,46  |
| Calcio (mg L <sup>-1</sup> )                        | 421,4   | 181,9   |
| Cloruro (mg L <sup>-1</sup> )                       | 893,8   | 735,1   |
| Hierro (mg L <sup>-1</sup> )                        | 32,1  | 11,2  |
| Magnesio (mg L <sup>-1</sup> )                      | 153,6   | 132,8   |
| Sodio (mg L <sup>-1</sup> )                         | 764,2   | 688   |
| Sulfato (mg L <sup>-1</sup> )                       | 196,8   | 81,7  |
| Fenol (mg L <sup>-1</sup> )                         | 783,8   | 175,4   |

(Heng, Nikraz, & Tse Hung, 2010)

Como el rango de los valores de concentración observados para varios constituyentes presentados en la tabla 2.1 es bastante grande, especialmente en vertederos nuevos, se debe tener mucho cuidado en la utilización de los diversos valores que se presentan. En tal tabla 2.2 se resumen los parámetros físicos, químicos y biológicos a supervisar.

Tabla 2.2 Parámetros de muestreo de los lixiviados

| <b>Físico</b> | <b>Constituyentes orgánicos</b> | <b>Constituyentes inorgánicos</b>                           | <b>Biológicos</b>  |
|---------------|---------------------------------|---|--|
| Aspecto       | Químicos orgánicos              | Sólidos en Suspensión (SS), Sólidos Totales Disueltos (STD) | Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)                          |
| pH            | Fenoles                         | Sólidos Volátiles en Suspensión (SVS),                      | Bacterias Coliformes(totales, fecales, fecales estreptococo) |

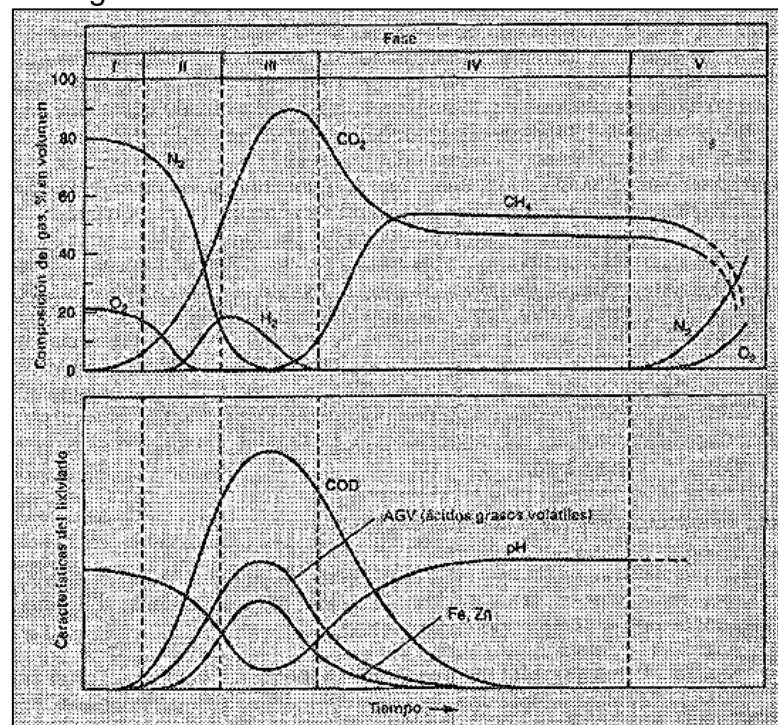
|                                  |  |   |                                |
|----------------------------------|--|---|--------------------------------|
|                                  |  | Sólidos Volátiles Disueltos (SDV)   |                                |
| Potencial de reducción oxidación | Demanda Química de Oxígeno (DQO)                   | Cloruros  | Recuento sobre placas estándar |
| Conductividad                    | Carbono Orgánico Total (COT)                       | Sulfatos  |                                |
| Color                            | Ácidos volátiles                                   | Fosfatos  |                                |
| Turbiedad                        | Taninos, ligninas                                  | Alcalinidad y acidez  |                                |
| Temperatura                      | N-Orgánico   | N-Nitrato   |                                |
| Olor                             | Solubles en éter (aceite y grasa)                  | N-Nitrito   |                                |
|                                  | Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)      | N-Amoniaco  |                                |
|                                  | Grupos funcionales orgánicos según sean requeridos | Sodio   |                                |
|                                  | Hidrocarburos Clorados                             | Potasio   |                                |
|                                  |  | Calcio<br>Magnesio<br>Dureza<br>Metales pesados (Pb,Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Fe, Mn, Hg, Ba, Ag)<br>Arsenio<br>Cianuro<br>Flúor<br>Selenio |                                |

(Andrés M. , 2001)

Debe resaltarse que la composición química de los lixiviados variará mucho según la antigüedad del vertedero y la historia previa al

momento de muestreo. Por ejemplo, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, el pH será bajo y las concentraciones de DBO<sub>5</sub>, COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altos. (Bueno, 1997). Por otro lado, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase de fermentación del metano, el pH estará dentro del rango de 6,5 a 7,5 y los valores de concentración de DBO<sub>5</sub>, COT, DQO y de los nutrientes serán significativamente más bajos. Similarmente, serán más bajas las concentraciones de metales pesados porque la mayoría de los metales son menos solubles para valores de pH neutros. El pH del lixiviado dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del CO<sub>2</sub> en el gas de vertedero que está en contacto con el lixiviado. La figura 3.3 muestra las fases de transformación del lixiviado. (Andrés & Cortijo, M., 2000)

Figura 2.2 Fases de transformación del lixiviado



(Álvarez & Suárez, 2006)



La biodegradabilidad del lixiviado variará con el tiempo. Se pueden supervisar los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado mediante el control de la relación  $DBO_5/DQO$ . Inicialmente, las relaciones estarán en el rango de 0,5 o más. Las relaciones en el rango de 0,4 a 0,6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En vertederos antiguos, la relación  $DBO_5/DQO$  está a menudo en el rango de 0,05 a 0,2. La relación cae porque los lixiviados procedentes de vertederos antiguos normalmente contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables. (Bueno, 1997)

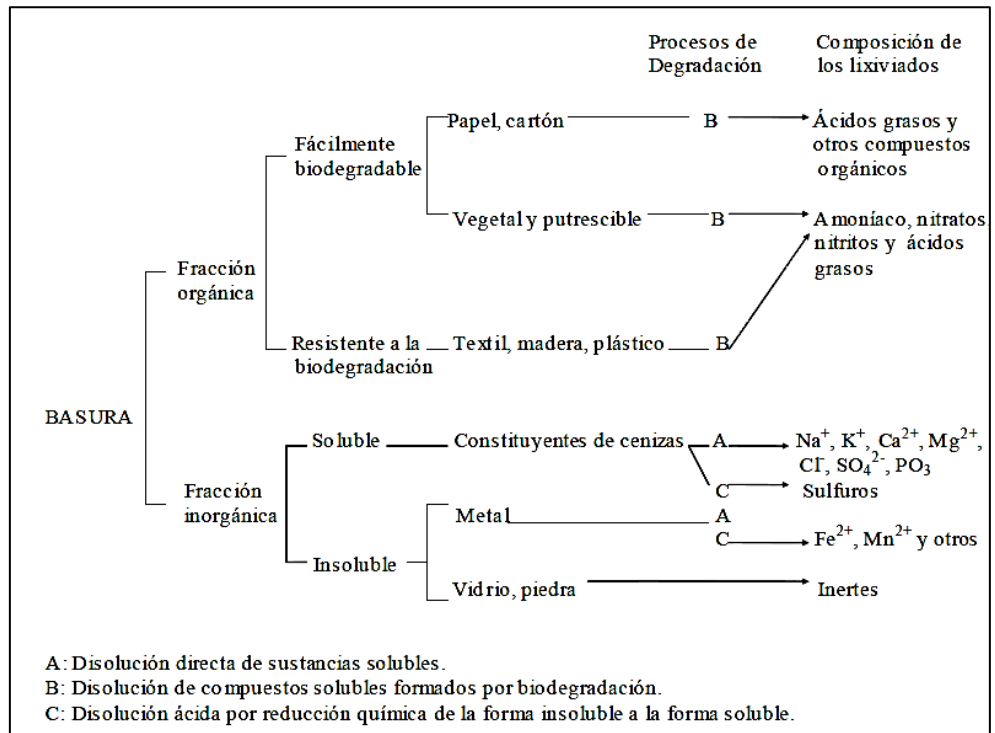
Como resultado de la diversidad en las características del lixiviado, el diseño de los sistemas de tratamiento del lixiviado es complicado. Por ejemplo, una planta de tratamiento diseñado para tratar un lixiviado con las características presentadas por un vertedero nuevo sería bastante diferente de una diseñada para tratar el lixiviado procedente de un vertedero antiguo. El problema de interpretación de los resultados que está generándose en un momento dado es una mezcla del lixiviado derivado de residuos sólidos de distintas edades. (Bueno, 1997)

#### **2.4.1.4 Factores que afectan a la composición del lixiviado**

Los factores que más influencia tienen en la composición del lixiviado son:

- a) La naturaleza del residuo: Es el factor de influencia más obvia y clara. Evidentemente, todos los contaminantes presentes en el lixiviado proceden, de una u otra forma, de los residuos depositados; así para el caso de RSU se representa en la figura 3.4 los contaminantes aportados por las basuras domésticas. (Bueno, 1997)

Figura 2.3 Origen de algunos de los compuestos presentes en el lixiviado



(Bueno, 1997)

b) La edad de depósito:

Para el caso de RSU, la edad del depósito marca la composición del lixiviado de acuerdo con las fases anteriormente indicados. Incluso con la edad del depósito se ha llegado a caracterizar el lixiviado según la relación DBO<sub>5</sub>/DQO.

En aras a su posible tratabilidad, en tres categorías:

I Relación > 0,3 lixiviado joven

II Relación entre 0,1 y 0,3 lixiviado medio

III Relación < 0,1 lixiviado viejo

c) La tecnología empleada, grado de compactación, frecuencia y forma de la cubrición entre otros, condicionan significativamente tanto el lixiviado producido como su composición.

Otros factores que se pueden considerar son:

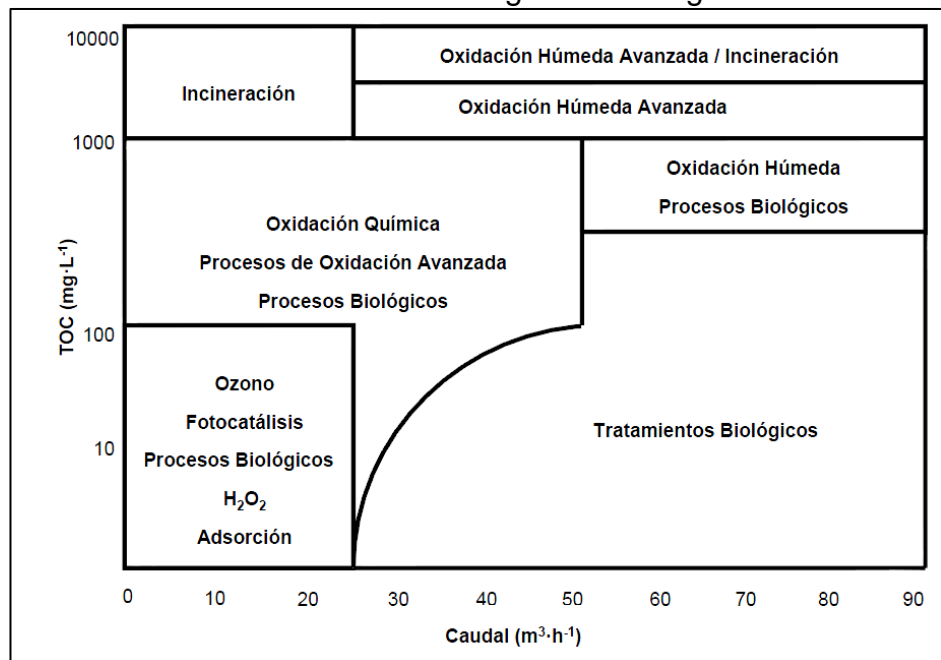
- El tratamiento previo del residuo

- La hidrogeología del lugar.
- El clima
- La estación del año.
- La forma de explotación (recirculación del lixiviado, altura y tipo de relleno, etc.)

### 2.4.2 Tipos de tratamiento de contaminantes líquidos

- No obstante, y a pesar de que los procesos biológicos han adquirido una elevada eficiencia, hoy en día existen tecnologías alternativas y procesos avanzados para el tratamiento de efluentes contaminados con compuestos orgánicos altamente tóxicos, refractarios y/o difícilmente biodegradables, bien para eliminarlos, o bien para reducir su toxicidad y el contenido de materia orgánica.

Figura 2.4 Aplicaciones de diversas tecnologías para el tratamiento de contaminantes orgánicos en aguas residuales



(Rios & Felipe Montoya, 2008)

### 2.4.3 Procesos de oxidación avanzada (POAs)

Un grupo de procesos adecuado para el tratamiento de contaminantes orgánicos en aguas, especialmente útiles para la degradación de compuestos no biodegradables. Son los procesos de oxidación avanzada (POAs) o. también llamados tecnologías de oxidación avanzada (TOAs).

Estos procesos se basan en la generación in situ de especies químicas con un alto poder de oxidación como los radicales hidroxilo (OH), oxidante químico de carácter no selectivo y con un elevado potencial de oxidación capaz de reaccionar rápidamente con muchos compuestos orgánicos (constantes cinéticas del orden de  $10^6$  -  $10^9$  M<sup>-1</sup>V<sup>-1</sup>) (Gogate & Pandit , 2004)

Los principales objetivos de la aplicación de POAs son:

- Mineralización de los contaminantes, especialmente los orgánicos recalcitrantes, hasta su completa transformación en dióxido de carbono, agua y aniones inorgánicos, evitando la formación de subproductos o residuos (procesos de carácter destructivo).
- Degradación de contaminantes orgánicos en compuestos más biodegradables y/o menos tóxicos (pretratamiento antes de un proceso biológico).
- Eliminación de color y/o olor.
- Desinfección.

La Tabla 2.3 muestra un listado de los potenciales de oxidación en medio ácido de los principales oxidantes químicos, en la cual queda reflejado el elevado poder de oxidación de los radicales hidroxilos con respecto a otros oxidantes. (Bacardit, 2007)

Tabla 2.3 Lista de las potencias de oxidación

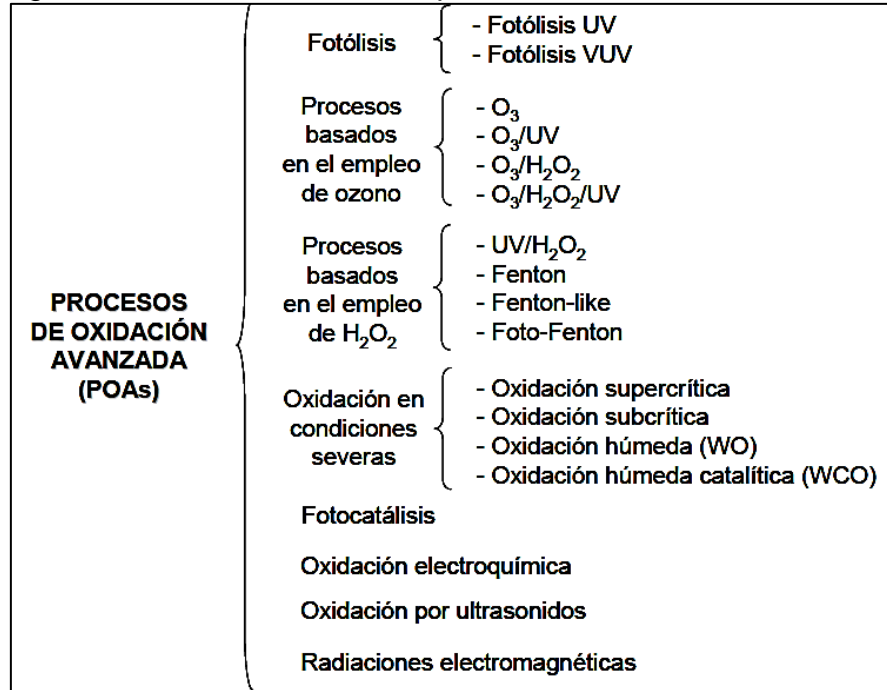
| Oxidante   | E° (V) |
|--|--------|
| Fluoruro (F <sup>-</sup> )                             | 3,03   |
| Radical hidroxilo (OH·)                                | 2,80   |
| Oxígeno atómico (O <sub>2</sub> )                      | 2,42   |
| Ozono (O <sub>3</sub> )                                | 2,07   |
| Peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) | 1,77   |
| Permanganato potásico (KMnO <sub>4</sub> )             | 1,67   |
| Ácido hipobromoso (HBrO)                               | 1,59   |
| Dióxido de cloro (ClO <sub>2</sub> )                   | 1,50   |
| Ácido hipocloroso (HClO)                               | 1,49   |
| Cloro (Cl <sub>2</sub> )                               | 1,36   |
| Bromo (Br <sub>2</sub> )                               | 1,09   |

(Roger Iván Méndez Novelo, 2010)

Muchos POAs se basan en la combinación de un oxidante fuerte (por ejemplo, ozono o peróxido de hidrógeno) con un catalizador (por ejemplo, iones de metales de transición o fotocatalizadores) y/o radiación (por ejemplo, UV o ultrasonidos). (Roger Iván Méndez Novelo, 2010)

Una de las posibles clasificaciones de los POAs es en función de la fuente de generación de la especie oxidante, es decir, el método para generar los radicales hidroxilos. Esta clasificación se muestra en el esquema de la Figura 2.5, donde se recogen los principales tipos de POAs: fotolíticos. Basados en el empleo de ozono, basados en el empleo de peróxido de hidrógeno, oxidación bajo condiciones severas, fotocatalíticos, electroquímicos o mediante ultrasonidos. La amplia variedad de técnicas disponibles evidencia la versatilidad de los POAs. Existen publicadas revisiones sobre los fundamentos de cada tipo de POAs. (Jaramillo Páez & Taborda Ocampo, 2006)

Figura 2.5 Clasificación de los procesos de oxidación avanzada



(Rios & Felipe Montoya, 2008)

En general, la utilización de estas técnicas de oxidación avanzada no conllevan un elevado coste si los valores de TOC del agua residual a tratar son inferiores a  $< 0,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , ya que concentraciones mayores suponen un consumo elevado de agentes oxidantes y de energía. No obstante, debe tenerse en cuenta que este coste se incrementa en función del grado de mineralización alcanzado por lo que, para conseguir una degradación total con costes asequibles, se suelen proponer tratamientos integrados donde se plantean AOPs fotoquímicos en combinación con procesos biológicos, como el descrito por Shannon en dos etapas, donde en un primer paso el efluente acuoso contaminado es tratado en un reactor biológico de membrana (una membrana de nanofiltración inmersa en un reactor

biológico) para posteriormente, en una segunda etapa, eliminar los patógenos y las moléculas de contaminante orgánico de menor peso molecular mediante fotocatalisis heterogénea.

Figura 2.6 Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (AOPs)

| No fotoquímicos   | Fotoquímicos  |
|---|---|
| Ozonización en medio alcalino [O <sub>3</sub> / OH]   | Fotólisis con radiación ultravioleta [UV]   |
| Ozonización con peróxido de hidrógeno [O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ]   | Peróxido de hidrógeno con radiación ultravioleta [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV]   |
| Ozonización catalítica [O <sub>3</sub> / catalizador]   | Ozono y radiación ultravioleta [O <sub>3</sub> / UV]  |
| Procesos Fenton y relacionados [Fe <sup>2+</sup> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] ó [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / Catalizador sólido] | Peróxido de hidrógeno, ozono y radiación ultravioleta [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / O <sub>3</sub> / UV]                             |
| Oxidación electroquímica / electrocatalítica  | Peróxido de hidrógeno, ozono y radiación ultravioleta [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / O <sub>3</sub> / UV]                             |
| Radiólisis y tratamiento con haces de electrones  | Foto-Fenton y relacionados [Fe <sup>2+</sup> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV] ó [Catalizador / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV] |
| Ultrasonidos  | Fotocatalisis heterogénea [Catalizador / O <sub>2</sub> / UV]   |

(Pirkanniemi & Sillanpaa , 2002)

La mayoría de los PAOs pueden aplicarse para el saneamiento y destoxificación de aguas residuales, generalmente en pequeña o mediana escala. Además, tienen capacidad para eliminar subproductos y patógenos tales como bacterias y virus. (Pirkanniemi & Sillanpaa , 2002)

#### 2.4.3.1 Fotocatalisis heterogénea

Como ya se ha indicado, la fotocatalisis heterogénea pertenece al grupo de las denominadas Tecnologías avanzadas de oxidación, conjuntamente con otros procesos basados también en la generación de radicales oxidantes. A su vez, este grupo es sólo una fracción de las herramientas desarrolladas por el hombre para el tratamiento de aguas. Aunque no existe una regla general, ya que cada aplicación

potencial de la fotocatalisis debe desarrollarse individualmente, las siguientes directrices generales acotan en un sentido amplio las condiciones en las que puede esperarse que un determinado caso real pueda ser abordado mediante técnicas de fotocatalisis con posibilidades de éxito:

La fotocatalisis se define como la aceleración de una reacción fotoquímica por la presencia de un metal semiconductor que es activado mediante la absorción de radiación con una energía por encima de su salto de banda. El término heterogéneo hace referencia a que los contaminantes están presentes en una fase fluida mientras el catalizador está en fase sólida. El catalizador más empleado es el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) debido a su elevada estabilidad química, su bajo coste y los excelentes resultados que ha demostrado proporcionar. (Gogate & Pandit , 2004)

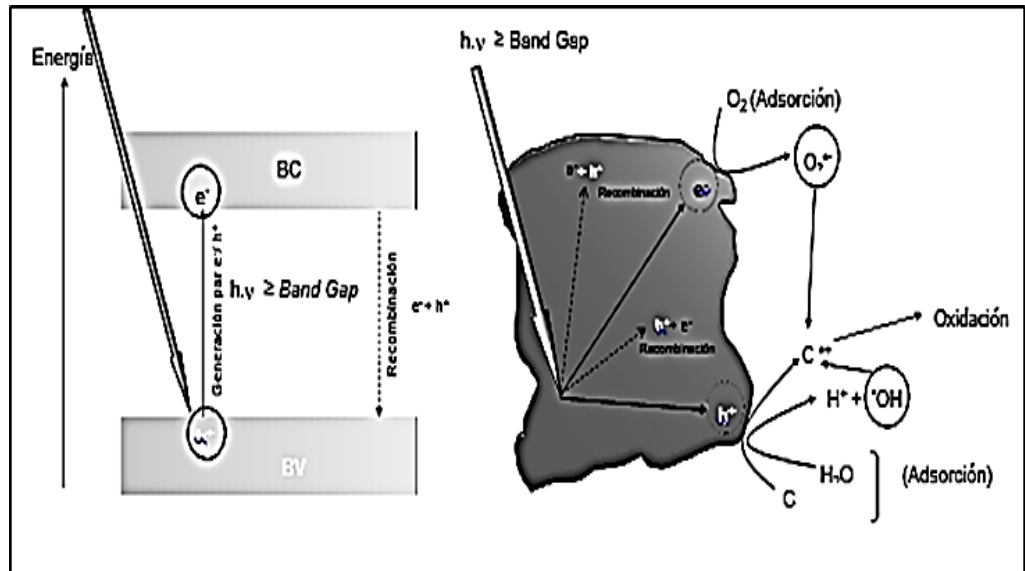
La fotocatalisis ha sido el proceso de oxidación avanzado más estudiado. La capacidad de generar especies oxidantes poderosas como los radicales libres hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ) con la ayuda de la radiación UV (solar o artificial), hace que esta tecnología sea atractiva para estas aplicaciones ambientales. En el caso de la fotocatalisis heterogénea, se emplean semiconductores (sólidos en suspensión acuosa o gaseosa).

El proceso fotocatalítico heterogéneo está basado en la excitación de un sólido- catalítico, normalmente un semiconductor de banda ancha como el  $\text{TiO}_2$ , mediante la absorción de luz de distintas longitudes de onda. En la Figura 2.5 se ha representado el diagrama de la energía de la banda de valencia (BV) y conducción (BC) durante el proceso de excitación de un semiconductor bajo irradiación. Asimismo, se puede observar el mecanismo global del proceso fotocatalítico heterogéneo que tiene lugar en una partícula de  $\text{TiO}_2$  suspendida en una fase



acuosa con un contaminante orgánico, C, empleando oxígeno como agente oxidante.

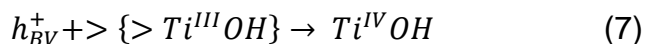
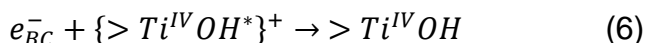
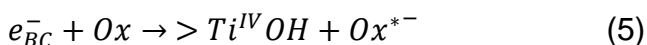
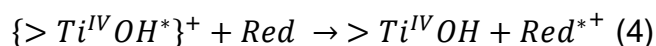
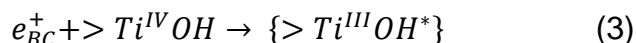
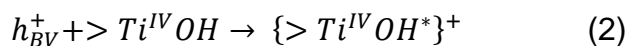
Figura 2.7. Esquema del proceso foto catalítica durante la oxidación de materia orgánica empleando  $O_2$  como oxidante. Izquierda: Diagrama de energía de la banda de valencia (BV) y conducción (BC) de un semiconductor. Derecha: Partícula de  $TiO_2$ .



(Narváez Campo , 2012)

El contaminante por sí mismo no es capaz de capturar fotones, se requiere el sensibilizador como absorbedor de la energía radiante y catalizador de la reacción de oxidación del contaminante. La aplicación de radiación solar para la realización de procesos fotoquímicos, sólo es posible mediante catálisis homogénea o heterogénea, usando cationes hierro o dióxido de titanio, respectivamente. Estos catalizadores absorben a longitudes de onda del espectro solar, mientras que el ozono y el peróxido de hidrógeno no absorben por encima de 300 nm, Por tanto la eficiencia final de la reacción fotocatalítica depende de muy diversos factores que determinan en definitiva el grado de oxidación total de la materia orgánica. La probabilidad de la recombinación del par electrón-hueco

en el seno o en la superficie del semiconductor resulta un proceso crítico debido a que no hay una separación física entre los sitios de las reacciones anódicas (oxidación por huecos) y catódica (reducción por electrones).



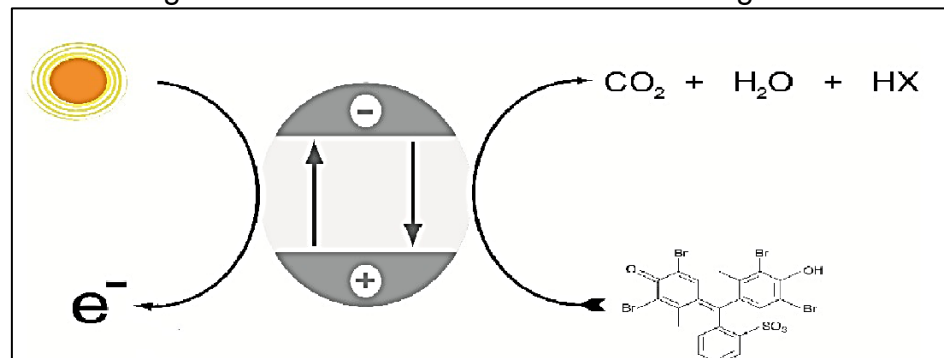
Una interesante aplicación en fotocatalisis heterogénea, consiste en la utilización de esta técnica para detectar las cargas foto-generadas, es decir, los centros paramagnéticos generados a partir de la radiación UV del semiconductor. En este sentido, la irradiación UV del  $TiO_2$  en vacío a bajas temperaturas revela señales características de los  $e^-$  foto-generados de la banda de conducción atrapados en los estados localizados  $Ti^{+3}$ , así como la de los  $h^+$  foto-generados en la banda de valencia localizados en centros  $O^-$ , formados según el siguiente esquema de reacción (Gruttadauria & Liotta, 2009)



Este proceso avanzado de oxidación está definido como la aceleración de una fotorreacción mediante la presencia de un catalizador, el cual, al ser activado por la absorción de la luz, acelera el proceso e

interacciona con la sustancia contaminante a través de un estado excitado ( $C^*$ ) o bien mediante la aparición de pares de electrón-hueco. Los electrones excitados son transferidos hacia la especie reducible, a medida que el catalizador acepta electrones de la especie oxidable que ocuparán los huecos ( $e^- h^+$ ); de esta manera, el flujo neto de los electrones será nulo y el catalizador permanecerá inalterado, y generará reacciones de óxido-reducción que provocan la degradación y la mineralización de la sustancia tratada. (Poulopoulos & Arvanitakis , 2006)

Figura 2.8. Proceso de fotocatalisis heterogénea



(Poulopoulos & Arvanitakis , 2006)

#### 2.4.3.2 Principio de la catálisis heterogénea

Cuando un catalizador semiconductor SC de tipo calcogenuro (óxidos o sulfuros) es iluminado con fotones cuya energía es igual o superior a la de la energía del bandgap, ocurre una absorción de estos fotones y una creación dentro del conjunto de pares electrón-hueco, que se disocian en fotoelectrones libres en la banda de conducción y en fotohuecos en la banda de valencia.

Simultáneamente, en presencia de una fase fluida (gas o líquido), ocurre una adsorción espontánea y, dependiendo del potencial redox (o nivel de energía) de cada adsorbato, se verifica una transferencia

de electrones hacia las moléculas aceptoras, mientras que un fotohueco positivo es transferido a una molécula donora (en realidad la transferencia del hueco corresponde a la cesión de un electrón por parte del donador al sólido).

Cada ion formado subsiguientemente reacciona para formar los intermediarios y los productos finales. Como consecuencia de las reacciones, la excitación fotónica del catalizador aparece como el primer paso de la activación de todo el sistema de catálisis. De allí que el fotón eficiente debe considerarse como un reactivo y el flujo de fotones como una fase fluida especial, la fase electromagnética. La energía del fotón debe adecuarse a las propiedades de absorción del catalizador, no de los reactivos. La activación del proceso pasa por la excitación del sólido, pero no por la de los reactivos: no hay proceso fotoquímico en la fase adsorbida sino un verdadero régimen fotocatalítico heterogéneo como se demostrará más adelante.

La actividad fotocatalítica puede verse reducido por la recombinación de electrones-hueco para formar un centro neutro N, según se describe en la figura 2.9, con liberación de una cantidad de energía E (igual a la del fotón absorbido), normalmente en forma de calor.

Figura 2.9 Diagrama de la banda de energía de una partícula esférica de dióxido de titanio b

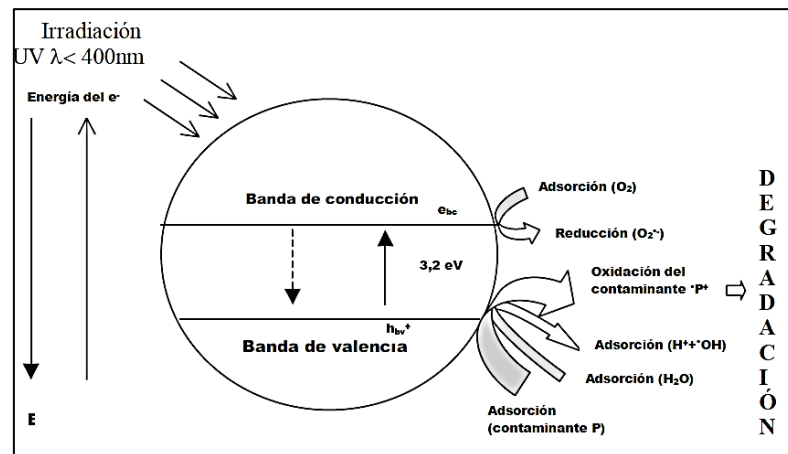
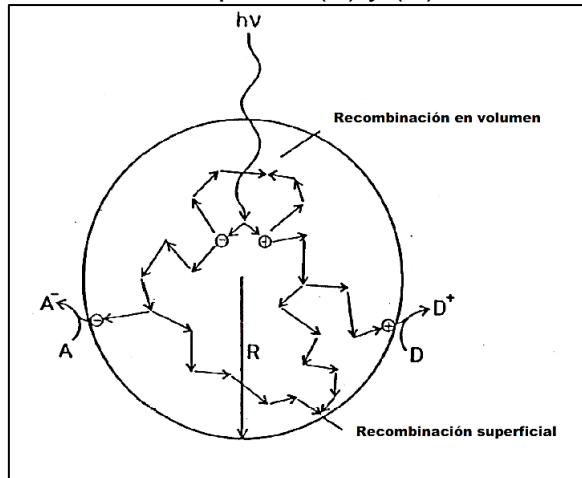


Figura 2.10 destino de los electrones y de los huecos dentro de una partícula esférica de óxido de titanio en presencia de moléculas aceptoras (A) y (D)



#### 2.4.4 Catalizadores

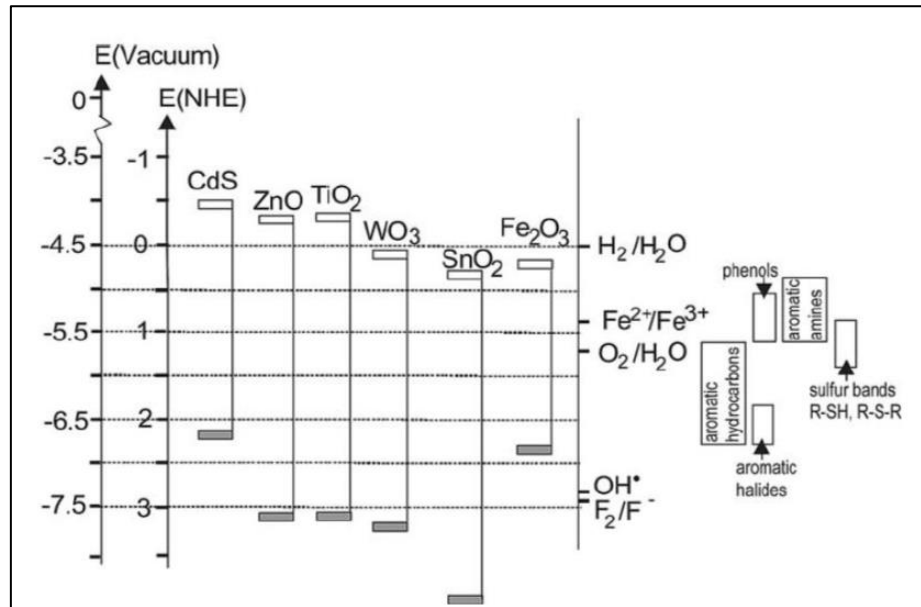
Se han utilizado varios calcogenuros (óxidos y sulfuros):  $TiO_2$ ,  $ZnO$ ,  $CeO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $Sb_2O_4$ ,  $CdS$ ,  $ZnS$ , etc. Se observa en general que los mejores desempeños fotocatalíticos, con máximos rendimientos, se obtienen siempre con dióxido de titanio.

Con el fin de aumentar su eficiencia fotocatalítica, el  $TiO_2$  ha sido sometido dopado con diversos iones metálicos, y también se ha intentado sensibilizar el catalizador a longitudes de ondas mayores, (luz visible). El dióxido de titanio es el catalizador más empleado ya que hasta ahora ha mostrado una mayor efectividad. Sin embargo, posee un área superficial específica baja ( $50 \text{ m}^2/\text{g}$ ), las dimensiones de partícula no son uniformes y cerca del 30% de su estructura cristalina es rutilo.

La eficiencia de estos viene determinada, principalmente, por la separación energética existente entre la banda de valencia y la de conducción, la cual se denominada "band gap". La Figura 2.5 muestra el "band gap" de diferentes semiconductores y algunos potenciales

estándares de parejas redox. (Jaramillo Páez & Taborda Ocampo, 2006)

Figura 2.11 destino Posición de las bandas de conducción y de valencia de diferentes semiconductores junto con algunos potencial redox



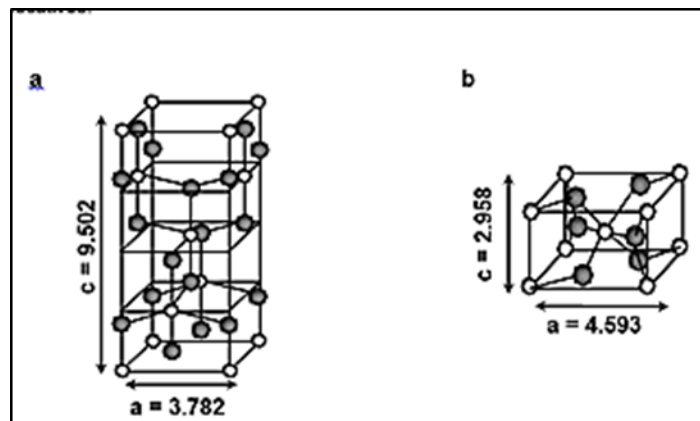
(Benz, 1997)

Los semiconductores más usuales presentan bandas de valencia con potencial oxidante (+1 a +3,5 V) y bandas de conducción moderadamente reductoras (+0,5 a -1,5 V) (Benz, 1997). Así pues, en presencia de especies redox adsorbidas en la partícula de semiconductor y bajo iluminación, ocurren simultáneamente reacciones de oxidación y de reducción en la superficie del semiconductor.

En este sentido, el TiO<sub>2</sub> presenta, entre otras ventajas deseables, un coste moderado o bajo debido a que el titanio es un elemento abundante en la corteza terrestre (0,44 % de la corteza terrestre), por lo que el TiO<sub>2</sub> es utilizado en una gran cantidad de productos como

pigmentos, protecciones solares, pinturas, pasta de dentífrica. Además, presenta una actividad fotocatalítica relativamente alta, estabilidad frente a la foto-corrosión (estabilidad fotoquímica), es inerte químicamente y su toxicidad es baja. Por otro lado, posee el inconveniente de que su anchura de banda prohibida corresponde a la región del espectro electromagnético del ultravioleta cercano, de manera que absorbe sólo una pequeña parte del espectro solar. Aunque otros semiconductores, como el CdS, son activos en la región visible del espectro solar, carecen sin embargo de la suficiente resistencia mecánica para una posible aplicación real dado que sufren foto-corrosión durante repetidos ciclos consecutivos. (Jaramillo Páez & Taborda Ocampo, 2006)

Figura 2.12 a: Celdilla unidad de la fase anatasa según la hoja patrón JCPDS 84-1286. Figura 3 b: Celdilla unidad de la fase Rutilo según la hoja patrón JCPDS 78-1509.



(Blanco & Malato, 1994)

El TiO<sub>2</sub> puede presentarse en diversos polimorfos, cada uno de ellos con estructuras cristalinas y electrónicas claramente distinguibles.

Normalmente se definen tres tipos de estructuras cristalinas del  $\text{TiO}_2$ : brookita, anatasa y rutilo. Las dos últimas parecen ser las más activas desde el punto de vista fotocatalítico, y han sido sin duda las más estudiadas. Estas dos estructuras pertenecen al sistema tetragonal, y pueden ser descritas como cadenas de octaedros  $\text{TiO}_6$  en las que cada ión  $\text{Ti}^{4+}$  está rodeado de un octaedro de seis iones  $\text{O}^{2-}$ . La distancia de los enlaces Ti-Ti en la anatasa son mayores, mientras que los enlaces  $\text{Ti-O}$  son más cortos que los del rutilo. Por otro lado, la presencia de un pequeño número de vacancias de oxígeno, compensadas por la presencia de  $\text{Ti}^{4+}$ , hacen del  $\text{TiO}_2$  un semiconductor extrínseco tipo-n.

Además, la anatasa es la forma alotrópica más activa entre las diferentes formas disponibles, ya sea natural o artificial (rutilo y brookita). En todos los sistemas descritos en el presente capítulo, el catalizador utilizado fue titania ( $\text{TiO}_2$  Degussa P-25, 50  $\text{m}^2/\text{g}$ , principalmente anatasa), a menos que se indique lo contrario. Dependiendo de la reacción considerada, es posible elegir diferentes fotorreactores:

Para experimentos de laboratorio, se utilizan fotorreactores en batch tipo slurry, ya sea con agitación mecánica o magnética, iluminados con lámparas. Para la detoxificación fotocatalítica es especialmente importante el fotorreactor experimental piloto de la Plataforma Solar

En definitiva, en las aplicaciones prácticas del proceso de degradación oxidativa, no basta la mera desaparición de los contaminantes; es imprescindible también la conversión de, al menos un importante porcentaje del carbón orgánico en carbón inorgánico, en forma de  $\text{CO}_2$ . El fin del proceso es la mineralización completa de todo el carbono orgánico, para asegurar que tanto el contaminante como cualquier otro producto intermedio formado durante el proceso fotocatalítico han sido degradados. En algunos casos, la degradación

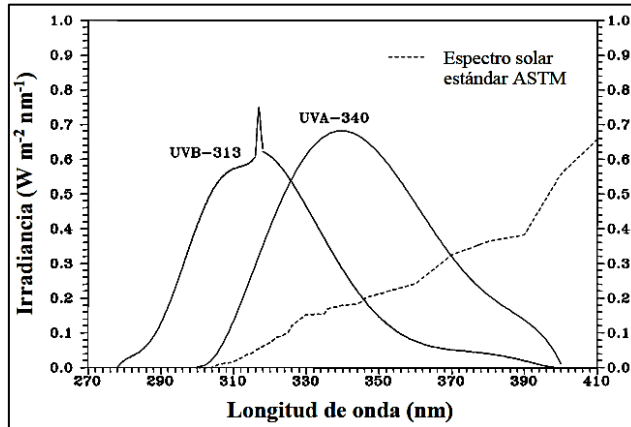


parcial del contaminante puede ser aceptable si el producto final es un producto inocuo. Por lo tanto, para un adecuado seguimiento del proceso fotocatalítico se utiliza una amplia variedad de mediciones químicas; las más importantes se describen brevemente a continuación. (Blanco & Malato, 1994)

#### **2.4.4.1 Tecnologías basadas en el uso de lámparas**

En un alto porcentaje de estudios sobre fotocatalisis se emplean lámparas como fuente de luz. Los aspectos abordados incluyen estudios específicos de la degradación de muy diversos contaminantes, la caracterización de nuevos catalizadores, incluyendo  $\text{TiO}_2$  en sus variantes (impurificado con iones metálicos como el Pt, sensibilizado con tintas y colorantes, formas nanocristalinas, etc.) así como la investigación sobre aspectos fundamentales de la fotocatalisis. Las lámparas más empleadas son de mercurio de xenón y los denominados simuladores solares. Estas lámparas proporcionan luz en un rango de longitudes de onda por debajo de los 400 nm, esencial para la excitación del  $\text{TiO}_2$ . Algunas proporcionan luz monocromática y otras un intervalo de longitudes de onda; en ocasiones se usan filtros a fin de obtener luz monocromática. Las intensidades empleadas van de los 2 a los 135  $\text{mW cm}^{-2}$  y las potencias de unas pocas decenas a cientos de vatios Figura 2.8 (Blanco & Malato, 1994). Para eliminar la radiación infrarroja y evitar el sobrecalentamiento, se han utilizados filtros especiales o de agua. El empleo de lámparas permite la caracterización precisa del tipo e intensidad de luz que se obtiene, sea por actinometría o mediante radiómetros.

Figura 2.13 distribución espectral de dos lámparas fluorescentes UV comerciales



#### 2.4.5 Parámetros que influyen en el proceso

Un gran número de parámetros influyen tanto cualitativa como cuantitativamente en el proceso de oxidación-reducción fotocatalizado y que, como consecuencia, resultan determinantes en la eficiencia global del proceso. A continuación se mencionan algunos de los más importantes. (Anpo & Yamashita , 1996).

- pH. Normalmente, el proceso de fotocatalisis es más eficiente en medio ácido (3 pH a pH5). El pH afecta las propiedades superficiales del catalizador y a la forma química del compuesto a degradar, y ello se manifiesta en alteraciones de la velocidad de degradación y en la tendencia a la floculación del catalizador. (Blanco & Malato, 1994)
- Características del catalizador son características ventajosas para un fotocatalizador una alta área superficial, una distribución de tamaño de partícula uniforme, forma esférica de las partículas y ausencia de porosidad interna. Normalmente se emplean polvos cuyas partículas tienen radios micrométricos
- Temperatura. La velocidad de las reacciones fotocatalíticas no se modifica apreciablemente con la variación de la temperatura del sistema, aún en ensayos llevados a cabo utilizando radiación solar. Este comportamiento es típico de reacciones iniciadas

fotoquímicamente, por absorción de un fotón. (Curco, Malato, & Giménez, 1996)

- Demanda Química de Oxígeno (DQO). Es la medida del oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidación contenida en una muestra. Su determinación se basa en la oxidación enérgica de la materia orgánica e inorgánica que se encuentra en el agua, en un medio fuertemente ácido con una solución valorada de dicromato de potasio. Los valores de este parámetro están asociados al grado de avance de la oxidación de los contaminantes, por lo que la determinación seriada de DQO es una herramienta útil de seguimiento del proceso.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>). Este parámetro se obtiene mediante una prueba empírica estándar, y mide la cantidad de oxígeno utilizado para la biodegradación de materia orgánica e inorgánica contenida en una muestra. El oxígeno se consume también en la oxidación de materia inorgánica como sulfuros o sales ferrosas. La prueba usa un tiempo fijo de incubación; la medición de oxígeno consumido en un período de 5 días (DBO<sub>5</sub>) es la más comúnmente empleada. Puede medirse también el oxígeno consumido hasta que no haya modificación alguna en la concentración de éste, lo que puede tomar entre 30 y 90 días de incubación (DBO<sub>última</sub>). El procedimiento es sencillo: se determina el oxígeno disuelto al inicio y al final del tiempo de incubación preestablecido. La DBO es simplemente la diferencia entre la concentración inicial y final de oxígeno disuelto.
- Determinación de productos inorgánicos. El seguimiento del proceso de fotocátalisis también puede realizarse indirectamente, midiendo el pH, o las concentraciones de iones inorgánicos como cloruro, nitrato, nitrito, fosfato, amonio y sulfato, entre otros, que resultan de la eliminación u oxidación de los heteroátomos

presentes en la estructura química de los contaminantes degradados como resultado del proceso oxidativo. En muchos casos, la determinación de la variación de la concentración de los iones respecto a tiempo es una manera simple y barata de llevar a cabo el control del proceso. Existen varias metodologías para estas determinaciones, que van desde métodos rápidos y precisos que requieren instrumentación importante, hasta simples valoraciones volumétricas. (Blanco & Malato, 1994)

- Toxicidad. La determinación de la toxicidad provee una prueba clave de la eficiencia de un proceso de degradación fotocatalítica, cuyo resultado esperado es la generación de una matriz libre de efectos nocivos sobre el ambiente. En el caso del agua, el producto deseable es un efluente que pueda ser vertido en cualquier cuerpo receptor sin afectar a ninguna de las especies del ecosistema. No existe una metodología única, o un organismo único de prueba de toxicidad que demuestre el cumplimiento de esta norma de conservación y protección ambiental, y es necesario usar un amplio repertorio de pruebas y organismos acuáticos bien definidos. El tipo de prueba y los organismos empleados dependerán del tipo de toxicidad que se desea determinar y el nivel de la cadena trófica sobre el cual se requiere determinar el efecto. La toxicidad crónica se determina mediante pruebas de crecimiento de *Ceriodaphnia dubia* y *Arbacia punctulata* e inhibición de crecimiento de *Selenastrum capricornutum*, invertebrados los dos primeros y alga la tercera. La determinación de toxicidad es también un parámetro vital en el acoplamiento de los procesos de degradación fotocatalítica con tratamientos biológicos. (Curco, Malato, & Giménez, 1996)
- Características y concentración del catalizador: Son características ventajosas para un foto catalizador una alta área superficial, una

distribución de tamaño de partícula uniforme, forma esférica de las partículas y ausencia de porosidad interna. En cuanto a la concentración de catalizador, es recomendable aquella en la cual todas las partículas están iluminadas y no existe un exceso que haga efecto pantalla y enmascare parte de la superficie de las partículas (Aznate, Cerro, & Benites., 2013).

- Intensidad de la radiación: El cambio de un orden parcial de 1 a 0,5 significa, la recombinación de electrones de la banda de valencia (ebv-) y huecos de la banda de conducción (hbc+) comienza a limitar el aprovechamiento de los fotones disponibles, y el cambio a un orden cero indica que el sustrato no puede generar más pares aun sí aumenta la intensidad de la radiación. Estos resultados son relevantes para el diseño de los colectores cuando se usa radiación solar (Aznate, Cerro, & Benites., 2013).
- Diseño del reactor: Los parámetros derivados del diseño y tipo del reactor juegan un papel importante en el resultado final de la reacción; factores como geometría, óptica, distribución de luz, tipo de flujo, etcétera, influyen en el rendimiento final del proceso. Los colectores cilindro-parabólicos compuestos (CPC), han resultado una de las mejores opciones tecnológicas en los tratamientos mediante fotocátalisis solar. El aprovechamiento de la componente difusa de la radiación UV por parte de los colectores parabólicos, mejora la cinética de reacción al aumentar la tasa de fotones incidentes al sistema. (Aznate, Cerro, & Benites., 2013).
- Naturaleza y concentración del contaminante: La naturaleza del contaminante a degradar ejerce una fuerte influencia en la cinética de degradación y en el mecanismo de reacción que éste sigue. Para los compuestos fenólicos, se han propuesto diversos mecanismos y, para el fenol en particular, se han detectado intermediarios diferentes en cada caso debido principalmente a

variaciones en las condiciones del medio de reacción. La determinación de los posibles intermediarios y su cinética de degradación adquiere importancia, ya que un proceso foto catalítica realmente eficiente debe remover tanto el contaminante original como los intermediarios formados.

## CAPÍTULO III

### 3 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

#### 3.1 Metodología

##### 3.1.1 Método

##### 3.1.1.1 Ubicación geográfica

El botadero “La Mejorada” se encuentra ubicada en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo, departamento de Junín a una latitud de  $12^{\circ} 02' 52''$  al sur y una longitud de  $75^{\circ} 14' 35''$  al Oeste, a una altura aproximada de 3201 m.s.n.m. (especificaciones en los anexos)



### **3.1.1.2 Procedimiento para la toma de muestras**

Para realizar la toma de muestra de los lixiviados del botadero “La Mejorada” se tomó en cuenta el siguiente procedimiento:

- a) Se organizaron las botellas de plástico con sus respectivos rótulos para identificarlas con mayor claridad.
- b) Al llegar al botadero “La Mejorada”, utilizamos los equipos de protección personal EPS, para evitar cualquier riesgo.
- c) En los puntos de muestreo, se solicitó la colaboración necesaria del personal técnico para efectuar el muestreo.
- d) Con ayuda del geoposicionador y del altímetro determinamos la latitud, longitud y altitud del sitio exacto de vertimiento del lixiviado.
- e) Se colocó un balde bajo la descarga de tal manera que reciba todo el flujo de lixiviado.
- f) Seguidamente con la utilización de un embudo se vertió el contenido de lixiviado del balde en la botella de plástico debidamente rotulada.
- g) Finalmente, estas fueron tapadas correctamente, para evitar derrames.

### **3.1.1.3 Preparación de compuestos del proceso foto catalítico heterogéneo**

Para el desarrollo de esta investigación se manipulo las variables en estudio, basándose en los conocimientos teóricos y los antecedentes de la investigación. El trabajo de investigación se desarrollara en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química de la UNCP, donde se trabajó con un sistema de Prueba de Jarras para poder tener una mezcla completa de los compuestos del proceso de fotocátalisis heterogénea, En donde se constató de 4 vasos de precipitación de un volumen de 500 mL y a 100 RPM, la recolección de la muestra se realizó a partir del protocolo de monitoreo de lixiviados, donde se



evaluaron: pH, DBO<sub>5</sub>, DQO y temperatura, las muestras fueron tratadas adecuadamente, en las condiciones necesarias para su conservación respectiva, además se les practico pruebas necesarias de laboratorio para la reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO, la investigación se llevó a cabo por el proceso de fotocátalisis heterogénea con diferentes concentraciones de los indicador utilizando dos lámpara UV de longitud de onda de 320 nm a 400 nm con 16 W de potencia. La muestra se sometió a una agitación a temperatura constante de 15 °C. Para la realización de reducción de la DBO<sub>5</sub> y DQO se adiciono la dosis de catalizador dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) de 0,5 gramos en combinación con peróxido de hidrogeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) de (100 mg/L, 200 mg/L, 300 mg/L) a volumen constante, se adiciono 55 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 0,1N a la muestra del lixiviado para obtener un pH de 3, se adiciono 52 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 0,1N a la muestra del lixiviado para obtener un pH de 4 y se adiciono 55 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 0,1N a la muestra del lixiviado para obtener un pH de 5, para cada tratamiento se expusieron a la radiación UV para el aceleramiento de la reacción. Después de terminado el proceso de fotocátalisis heterogénea se tomaron muestra de 30 mL a 4 cm de la superficie para determinar previa dilución de la materia orgánica, la muestra con las mejores características se define como la óptima, terminada esta fase se procedió a la respectiva recolección de datos para la determinación de reducción de la materia orgánica de los lixiviados generados en los botaderos. Los valores fueron comparados con los obtenidos inicialmente y así determino la reducción obtenida.

### **3.1.2 Tipo de la investigación**

El tipo de investigación es experimental, en este caso se controló la variable independiente y la conformación de los grupos que necesita

para el estudio. Este tipo de investigación permite determinar el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente.

### 3.1.3 Nivel de la investigación

El nivel de investigación es correlacional, tiene como finalidad establecer el grado de relación o asociación no causal existente entre dos o más variables. Se caracteriza porque primero se mide las variables y luego, mediante pruebas de hipótesis correlacionales y la aplicación de técnicas estadísticas, se estima la correlación.

## 3.2 Diseño de la investigación.

El diseño es de tipo experimental ya que fue sometido el objeto de estudio (en este caso el lixiviado del botadero la mejorada) a determinadas condiciones o estímulos (variables independientes), para observar los efectos que se producen (variables dependientes).

El diseño de la investigación realizado corresponde al diseño factorial simple de 2 variables ( $X_1$ ,  $X_2$ ) y 3 niveles tomando la referencia de (Aznate, Cerro, & Benites., 2013), donde  $X_1$ =concentración de  $H_2O_2$ ,  $X_2$ =pH y  $Y$ = DBO<sub>5</sub> y DQO Como se muestra en el diseño se hizo 9 experimentos y sus réplicas respectivas. Por lo cual se tuvo un total de 18 experimentos.

$$Y=f(X)$$

Tabla 3.1. Diseño Experimental Factorial

| PRUEBA | CODIFICADO |    | REAL                          |    |
|--------|------------|----|-------------------------------|----|
|        | X1         | X2 | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | pH |
| 1      | -1         | -1 | 100 mg/L                      | 3  |
| 2      | 0          | -1 | 200 mg/L                      | 3  |
| 3      | 1          | -1 | 300 mg/L                      | 3  |
| 4      | -1         | -1 | 100 mg/L                      | 4  |
| 5      | 0          | -1 | 200 mg/L                      | 4  |
| 6      | 1          | -1 | 300 mg/L                      | 4  |
| 7      | -1         | -1 | 100 mg/L                      | 5  |
| 8      | 0          | -1 | 200 mg/L                      | 5  |

|   |   |    |          |   |
|---|---|----|----------|---|
| 9 | 1 | -1 | 300 mg/L | 5 |
|---|---|----|----------|---|

### 3.3 Hipótesis de la investigación

#### 3.3.1 Hipótesis general

La eficiencia de la aplicación del proceso de fotocátalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  permite significativamente a reducir el alto índice de toxicidad,  $\text{DBO}_5$  y  $\text{DQO}$  de los lixiviados del botadero la Mejorada.

#### 3.3.2 Hipótesis específicas

- Las características fisicoquímicas que se encuentran presente en los lixiviados superan los límites máximos permisibles.
- La dosificación del catalizador  $\text{TiO}_2$  en combinación con  $\text{H}_2\text{O}_2$  en medios ácidos reduce significativamente el  $\text{DBO}_5$  y  $\text{DQO}$  en un proceso de fotocátalisis heterogénea de los lixiviados del botadero la Mejorada.
- La reducción de  $\text{DBO}_5$  y  $\text{DQO}$  del lixiviado es significativa mediante el proceso de fotocátalisis heterogénea de los lixiviados.

### 3.4 Variables

#### 3.4.1 Variable independiente

- Fotocátalisis Heterogénea  
 $X_1$ =Peróxido de hidrogeno (mg/L)
- Medio acido  
 $X_2$ =pH

#### 3.4.2 Variable dependiente

- % de Reducción de Materia Orgánica  
**Indicadores**  
 $Y_1$ =concentración de  $\text{DBO}_5$ (mg/L)  
 $Y_2$ =concentración de  $\text{DQO}$  (mg/L)

### **3.5 Cobertura del Estudio**

#### **3.5.1 Universo**

Los lixiviados de todos los botaderos de residuos sólidos del Perú.

#### **3.5.2 Población**

La población está compuesta por los lixiviados del botadero de residuos sólidos de La Mejorada.

#### **3.5.3 Muestra**

La muestra está compuesta por un volumen de 500 mL de lixiviado del botadero para cada muestra, se realizó según el diseño experimental.

#### **3.5.4 Muestreo**

El muestreo realizado de los lixiviados del botadero La Mejorada fue realizada de forma compuesto debido a que no cuenta con un lugar puntual del segrega miento del lixiviado.

### **3.6 Técnicas e instrumentos**

#### **3.6.1 Técnicas de la investigación**

Las técnicas utilizadas para recolección de datos fueron:

- Observación de Campo (toma de muestra y monitoreo, mediciones de temperatura, pH y DBO<sub>5</sub> y DQO)

#### **3.6.2 Instrumentos de la investigación**

- Espectrofotómetro Uv –Visible
- pHmetro
- Termómetro
- Cronometro
- Conductímetro
- Equipo de prueba de jarras
- Lámparas de Radiación UV

#### **3.6.3 Fuentes**

- Muestras de los lixiviados del botadero agua de la Mejorada

- Corridas experimentales con un sistema de prueba de jarras según el diseño experimental
- Resultados de los Análisis del espectrofotómetro de DQO y DBO
- Informes técnicos y reportes de artículos científicos.

### **3.7 Procesamiento estadístico de la información**

#### **3.7.1 Estadísticos**

Software

- Microsoft Excel
- Programa “Minitab 19”

#### **3.7.2 Representación**

Mediante gráficos y ecuaciones matemáticas que fundamente la investigación y artículos de investigaciones realizadas que tengan similitud al trabajo de investigación que se está realizando

#### **3.7.3 Técnica de comprobación de la hipótesis.**

Comprobación de hipótesis mediante una ANOVA de TUKEY

## **CAPITULO IV**

### **4 ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **4.1 Resultados.**

Realizados y analizados las pruebas experimentales con las variaciones de las variables independientes según el diseño experimental planteado en el capítulo anterior se reportaron los siguientes resultados en los reportes de análisis que se realizaron:

##### **4.1.1 Caracterización de los lixiviados**

Las muestras para la caracterización de los lixiviados del botadero La Mejorada el Tambo – Huancayo, se tomaron en la época de estiaje que comprende los meses de (abril hasta junio) del presente año en ausencia de lluvias, el muestreo se realizó según la metodología explicada en el capítulo anterior, obteniendo los siguientes resultados en la Tabla 4.1, del reporte N° xxx emitido por la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Perú.

Tabla 4.1 Caracterización de los lixiviados

| <b>Muestra de lixiviado</b> |                        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|
| <b>Parámetros</b>           | <b>Expresados como</b> |        |
| DBO <sub>5</sub>            | mg/L                   | 3859,5 |
| DQO                         | mg/L                   | 5677,8 |
| Dureza total                | CaCO <sub>3</sub>      | 5208   |
| alcalinidad total           | CaCO <sub>3</sub>      | 7315   |
| Potencial de Hidrogeno      | pH                     | 8,94   |
| Conductividad               | μs/cm                  | 5789   |
| Solidos totales             | unidades               | 8561   |

#### 4.1.2 Resultados de los experimentos

- a) Los resultados que se obtuvieron, a las condiciones de 100 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con una mezcla completa mediante un equipo de prueba de jarra con 100 RPM y la radiación UV mediante una lámpara de 16W de potencia, se adicióno la dosis de catalizador de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) de 0,5 gramos.

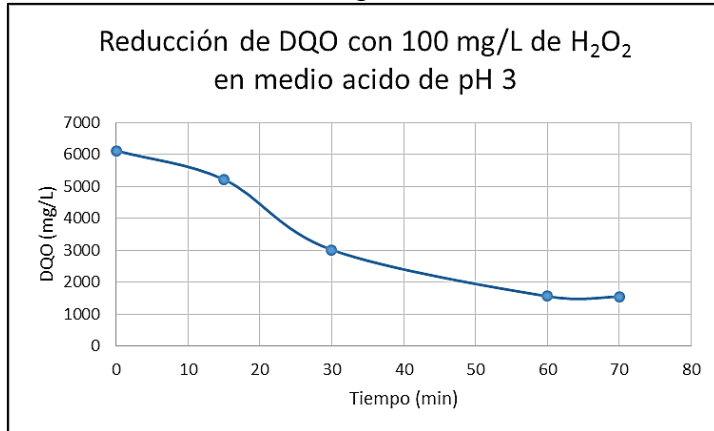
Tabla 4.2 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3

| <b>Nº</b> | <b>TRH</b> | <b>pH</b> | <b>Temperatura</b> | <b>DBO<sub>5</sub></b> | <b>DQO</b> |
|-----------|------------|-----------|--------------------|------------------------|------------|
| 1         | 0          | 3,01      | 15,1               | 3925,8                 | 6125,3     |
| 2         | 15         | 3,86      | 15,6               | 2916,7                 | 5221,5     |
| 3         | 30         | 4,62      | 15,7               | 1505,2                 | 3018,2     |
| 4         | 60         | 5,87      | 15,9               | 752,6                  | 1565,9     |
| 5         | 70         | 5,90      | 15,8               | 742,2                  | 1552,4     |

En la tabla 4.2 y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 3,01 hasta 5,90; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,1 °C hasta 15,9 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3925,8 mg/L y termina en 742,2 mg/L; en la

quinta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 6125,3 mg/L y finaliza con 1552,4 mg/L.

Figura 4.1 Reducción de DQO con 100mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en medio ácido de pH 3



En la figura 4.1 se muestra la reducción de carga orgánica mediante el DQO en diferentes tiempos de retención hidráulica para los 15 min la reducción es ligeramente baja para los 30 minutos se encuentra la mayor reducción, para los 60 min se tiene una reducción regular, después de los 60 minutos de estar en contacto con el catalizador de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) de 0,5 gramos. y a una mezcla completa de 100 rpm del tratamiento se mantiene constante la reducción, por lo tanto solo limitamos en los primeros 60 minutos para cada tratamiento posteriores, al igual que el DQO el DBO<sub>5</sub> tiene la misma característica de permanecer constante la reducción a partir de los 60 minutos

Tabla 4.3 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3 Replica

| Nº | TRH | pH   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 3,01 | 15,1        | 3925,8           | 6125,3 |
| 2  | 15  | 3,94 | 15,4        | 2899,2           | 5315,1 |
| 3  | 30  | 4,54 | 15,6        | 1499,7           | 3015,9 |
| 4  | 60  | 5,67 | 15,9        | 700,9            | 1511,0 |
| 5  | 70  | 5,80 | 15,6        | 702,8            | 1500,2 |



En la tabla 4.3 representamos resultados de las corridas experimentales de las réplicas en medio ácido de pH 3; y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante de 100 revoluciones por minuto (RPM), en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 3,01 hasta 5,80; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,1 °C hasta 15,9 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3925,8 mg/L y termina en 702,8 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 6125,3 mg/L y finaliza con 1500,2 mg/L.

Tabla 4.4 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4

| <b>Nº</b> | <b>TRH</b> | <b>pH</b> | <b>Temperatura</b> | <b>DBO<sub>5</sub></b> | <b>DQO</b> |
|-----------|------------|-----------|--------------------|------------------------|------------|
| 1         | 0          | 4,05      | 15,2               | 3925,8                 | 6125,3     |
| 2         | 15         | 4,53      | 15,4               | 2999,1                 | 5398,8     |
| 3         | 30         | 5,04      | 15,5               | 1587                   | 3045,2     |
| 4         | 60         | 5,98      | 15,8               | 724,5                  | 1702,4     |

En la tabla 4.4 y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 4,05 hasta 5,98; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,2 °C hasta 15,8 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3925,8 mg/L y termina en 724,5 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 6125,3 mg/L y finaliza con 1702,4 mg/L.

Tabla 4.5 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4 Replica

| <b>Nº</b> | <b>TRH</b> | <b>pH</b> | <b>Temperatura</b> | <b>DBO<sub>5</sub></b> | <b>DQO</b> |
|-----------|------------|-----------|--------------------|------------------------|------------|
| 1         | 0          | 4,05      | 15,1               | 3925,8                 | 6125,3     |

|   |    |      |      |        |        |
|---|----|------|------|--------|--------|
| 2 | 15 | 4,56 | 15,5 | 3001,4 | 5300,8 |
| 3 | 30 | 5,12 | 15,5 | 1487,2 | 2989,3 |
| 4 | 60 | 6    | 15,7 | 700,8  | 1687,1 |

En la tabla 4.5 representamos resultados de las corridas experimentales de las réplicas en medio ácido de pH 4; y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 4,05 hasta 6; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,1 °C hasta 15,7 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3925,8 mg/L y termina en 700,8 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 6125,3 mg/L y finaliza con 1687,1 mg/L.

Tabla 4.6 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5

| Nº | TRH | pH   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 4,99 | 15,1        | 3925,8           | 6125,3 |
| 2  | 15  | 5,29 | 15,3        | 3087,9           | 5284,5 |
| 3  | 30  | 6,02 | 15,5        | 1500,1           | 3024,1 |
| 4  | 60  | 6,35 | 15,8        | 815,6            | 1789,2 |

En la tabla 4.6 y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 4,99 hasta 6,35; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,1 °C hasta 15,8 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3925,8 mg/L y termina en 815,6 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 6125,3 mg/L y finaliza con 1789,2 mg/L.

Tabla 4.7 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5 Replica

| Nº | TRH | Ph   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 4,99 | 15,1        | 3925,8           | 6125,3 |
| 2  | 15  | 5,33 | 15,2        | 3124             | 5307,8 |
| 3  | 30  | 6,1  | 15,4        | 1698,7           | 3124,3 |
| 4  | 60  | 6,42 | 15,6        | 902,1            | 1873,1 |

En la tabla 4.7 representamos resultados de las corridas experimentales de las réplicas en medio ácido de pH 5; y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores del pH que fluctúan de 4,99 hasta 6,42; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,1 °C hasta 15,6 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3925,8 mg/L y termina en 902,1 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciada en 6125,3 mg/L y finaliza con 1873,1 mg/L.

- b) Los resultados que se obtuvieron, a las condiciones de 200 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con una mezcla completa mediante un equipo de prueba de jarra con 100 RPM y la radiación UV mediante una lámpara de 16W de potencia.

Tabla 4.8 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3

| Nº | TRH | pH   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 3,02 | 15,3        | 3315,3           | 4988,7 |
| 2  | 15  | 3,8  | 15,5        | 2411,1           | 4201,1 |
| 3  | 30  | 4,62 | 15,7        | 1222,6           | 2314,6 |
| 4  | 60  | 5,99 | 15,9        | 569              | 1087,4 |

En la tabla 4.8 y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 3,02 hasta 5,99; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,3 °C hasta 15,9 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3315,3 mg/L y termina en 569 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 4988,7 mg/L y finaliza con 1087,4 mg/L.

Tabla 4.9 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3 Replica

| Nº | TRH | pH   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 3,02 | 15,3        | 3315,3           | 4988,7 |
| 2  | 15  | 3,73 | 15,4        | 2400,9           | 4258,6 |
| 3  | 30  | 4,72 | 15,8        | 1299,9           | 2387,2 |
| 4  | 60  | 5,84 | 16          | 600,2            | 1102,4 |

En la tabla 4.9 representamos resultados de las corridas experimentales de las réplicas en medio ácido de pH 3; y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 3,02 hasta 5,84; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,3 °C hasta 16 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3315,3 mg/L y termina en 600,2 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 4988,7 mg/L y finaliza con 1102,4 mg/L.

Tabla 4.10 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4

| Nº | TRH | pH   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 3,99 | 15,1        | 3315,3           | 4988,7 |

|   |    |      |      |        |        |
|---|----|------|------|--------|--------|
| 2 | 15 | 4,55 | 15,3 | 2062,2 | 3912,6 |
| 3 | 30 | 5,67 | 15,3 | 1000,6 | 2001,4 |
| 4 | 60 | 6,21 | 15,6 | 503,4  | 1022,4 |

En la tabla 4.10 y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 3,99 hasta 6,21; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,1 °C hasta 15,6 °C, en la quinta columna se tiene los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3315,3 mg/L y termina en 503,4 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 4988,7 mg/L y finaliza con 1022,4 mg/L.

Tabla 4.11 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4 Replica

| Nº | TRH | Ph   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 3,99 | 15,1        | 3315,3           | 4988,7 |
| 2  | 15  | 4,62 | 15,4        | 2111,7           | 3957,8 |
| 3  | 30  | 5,34 | 15,6        | 999,9            | 1999,9 |
| 4  | 60  | 6,03 | 15,8        | 469,1            | 1000,7 |

En la tabla 4.11 se representan resultados de las corridas experimentales de las réplicas en medio ácido de pH 4; y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 3,99 hasta 6,03; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,1 °C hasta 15,8 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3315,3 mg/L y termina en 469,1 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 4988,7 mg/L y finaliza con 1000,7 mg/L.

Tabla 4.12 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5

| <b>Nº</b> | <b>TRH</b> | <b>pH</b> | <b>Temperatura</b> | <b>DBO<sub>5</sub></b> | <b>DQO</b> |
|-----------|------------|-----------|--------------------|------------------------|------------|
| 1         | 0          | 5         | 14,8               | 3315,3                 | 4988,7     |
| 2         | 15         | 5,25      | 15,1               | 2600,9                 | 4006,3     |
| 3         | 30         | 6,04      | 15,2               | 1202,7                 | 2315,5     |
| 4         | 60         | 6,47      | 15,6               | 559,1                  | 1189,4     |

En la tabla 4.12 y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 5 hasta 6,47; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 14,8 °C hasta 15,6 °C, en la quinta columna se tiene los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3315,3 mg/L y termina en 559,1 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 4988,7 mg/L y finaliza con 1189,4 mg/L.

Tabla 4.13 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5 Replica

| <b>Nº</b> | <b>TRH</b> | <b>pH</b> | <b>Temperatura</b> | <b>DBO<sub>5</sub></b> | <b>DQO</b> |
|-----------|------------|-----------|--------------------|------------------------|------------|
| 1         | 0          | 5         | 14,8               | 3315,3                 | 4988,7     |
| 2         | 15         | 5,31      | 15                 | 2611,8                 | 3999,2     |
| 3         | 30         | 5,97      | 15,3               | 1924                   | 2366,6     |
| 4         | 60         | 6,39      | 15,6               | 601,1                  | 1201,8     |

En la tabla 4.13 representamos resultados de las corridas experimentales de las réplicas en medio ácido de pH 5; y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 5 hasta 6,39; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 14,8 °C hasta 15,6 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que

inicia en 3315,3 mg/L y termina en 601,1 mg/L; en la quinta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 4988,7 mg/L y finaliza con 1201,8 mg/L.

- c) Los resultados que se obtuvieron, a las condiciones de 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con una mezcla completa mediante un equipo de prueba de jarra con 100 RPM y la radiación UV mediante una lámpara de 16W de potencia.

Tabla 4.14 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3

| Nº | TRH | pH   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 3,1  | 15,3        | 3812,1           | 5697   |
| 2  | 15  | 3,9  | 15,3        | 2616,4           | 4105,2 |
| 3  | 30  | 4,51 | 15,5        | 1291             | 2294,3 |
| 4  | 60  | 6,42 | 15,7        | 501,2            | 1053,5 |

En la tabla 4.14 y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 3,04 hasta 6,42; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,3 °C hasta 15,7 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3812,1 mg/L y termina en 501,2 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciado en 5697 mg/L y finaliza con 1053,5 mg/L.

Tabla 4.15 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 3 Replica

| Nº | TRH | pH   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 3,1  | 15,3        | 3812,1           | 5697   |
| 2  | 15  | 3,81 | 15,2        | 2605             | 4099,8 |
| 3  | 30  | 4,5  | 15,6        | 1299,9           | 2300,1 |
| 4  | 60  | 6,32 | 15,8        | 515,5            | 1098,2 |

En la tabla 4.15 se representan los resultados de las corridas experimentales de las réplicas en medio ácido de pH 3; y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 3,05 hasta 6,32; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 15,2 °C hasta 15,8 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3812,1 mg/L y termina en 515,5 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciada en 5697 mg/L y finaliza con 718,3 mg/L.

Tabla 4.16 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4

| <b>Nº</b> | <b>TRH</b> | <b>pH</b> | <b>Temperatura</b> | <b>DBO<sub>5</sub></b> | <b>DQO</b> |
|-----------|------------|-----------|--------------------|------------------------|------------|
| 1         | 0          | 4,1       | 14,9               | 3812,1                 | 5697       |
| 2         | 15         | 4,67      | 15,1               | 2158,1                 | 4031,8     |
| 3         | 30         | 5,39      | 15,4               | 1008,5                 | 2102,4     |
| 4         | 60         | 6,55      | 15,6               | 205,7                  | 718,3      |

En la tabla 4.16 y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 4,1 hasta 6,55; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 14,9 °C hasta 15,6 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3812,1 mg/L y termina en 205,7 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciada en 5697 mg/L y finaliza con 718,3 mg/L.

Tabla 4.17 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 4 Replica

| <b>Nº</b> | <b>TRH</b> | <b>pH</b> | <b>Temperatura</b> | <b>DBO<sub>5</sub></b> | <b>DQO</b> |
|-----------|------------|-----------|--------------------|------------------------|------------|
| 1         | 0          | 4,1       | 14,9               | 3812,1                 | 5697       |



|   |    |      |      |        |        |
|---|----|------|------|--------|--------|
| 2 | 15 | 4,55 | 15,2 | 2489,4 | 4022,6 |
| 3 | 30 | 5,8  | 15,4 | 999,9  | 2099,8 |
| 4 | 60 | 6,62 | 15,7 | 200,5  | 689,2  |

En la tabla 4.17 representamos resultados de las corridas experimentales de las réplicas en medio ácido de pH 4; y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 4,1 hasta 6,62; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 14,9 °C hasta 15,7 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3812,1 mg/L y termina en 200,5 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciada en 5697 mg/L y finaliza con 689,2 mg/L.

Tabla 4.18 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5

| Nº | TRH | pH   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 5,05 | 14,8        | 3812,1           | 5697   |
| 2  | 15  | 5,64 | 15,1        | 2659             | 4181,2 |
| 3  | 30  | 6,08 | 15,3        | 1199             | 2304,2 |
| 4  | 60  | 6,72 | 15,8        | 385,6            | 958,9  |

En la tabla 4.18 y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 5,05 hasta 6,72; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 14,8 °C hasta 15,8 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3812,1 mg/L y termina en 385,6 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciada en 5697 mg/L y finaliza con 958,9 mg/L.

Tabla 4.19 DBO<sub>5</sub> y DQO en un medio de pH 5 Replica

| Nº | TRH | pH   | Temperatura | DBO <sub>5</sub> | DQO    |
|----|-----|------|-------------|------------------|--------|
| 1  | 0   | 5,05 | 14,8        | 3812,1           | 5697   |
| 2  | 15  | 5,56 | 15,1        | 2640,8           | 4100,3 |
| 3  | 30  | 6,1  | 15,2        | 1181,3           | 2311,7 |
| 4  | 60  | 6,69 | 15,5        | 399,6            | 961,1  |

En la tabla 4.19 representamos resultados de las corridas experimentales de las réplicas en medio ácido de pH 5; y en la segunda columna se muestra los valores del tiempo de retención hidráulica (TRH) que permanecieron las muestras con una revolución constante, en la tercera columna se tienen los valores el pH que fluctúan de 5,05 hasta 6,69; en la cuarta columna se presenta la temperatura que varía de 14,8 °C hasta 15,5 °C, en la quinta columna tenemos los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno que inicia en 3812,1 mg/L y termina en 399,6 mg/L; en la sexta columna se muestra la demanda química de oxígeno iniciada en 5697 mg/L y finaliza con 961,1 mg/L.

#### 4.1.3 Análisis económico

A continuación, se detalló los costos de inversión que llevo en los experimentos realizados en el laboratorio, ya que es igual que en cualquier otro proyecto de ingeniería, incluye todos los costos puesta en marcha del sistema, sin embargo, se asume que los servicios como agua están disponibles en la ubicación del montaje sin costo adicional. El tratamiento realizado a los lixiviados tiene un costo aproximado de

| DESCRIPCION   | UNIDAD DE MEDIDA | CANTIDAD | COSTO UNITARIO S./ | COSTO TOTAL S./ |
|---|------------------|----------|--------------------|-----------------|
| <b>BIENES</b>   |                  |          |                    |                 |
| Recopilación de información:<br><i>Libros, textos y otros materiales impresos</i> | Unid.            | 5        | 50.00              | <b>250.00</b>   |

|  |          |     |        |                |
|--|----------|-----|--------|----------------|
| Recopilación de información:<br><i>Servicio de internet</i>                  | Horas    | 150 | 1.00   | <b>150.00</b>  |
| Materiales de oficina en general   | Varios   | 1   | 100.00 | <b>100.00</b>  |
| Implementos de muestreo:<br>Guardapolvo                                      | Unid.    | 1   | 25.00  | <b>25.00</b>   |
| Mascarillas  | Unid.    | 10  | 0.50   | <b>5.00</b>    |
| Guantes quirúrgicos  | Caja     | 1   | 42.00  | <b>38.00</b>   |
| <b>EQUIPOS Y MATERIALES</b>  |          |     |        |                |
| Equipos e instrumentos de medición: Espectroscopia UV DQO y DBO <sub>5</sub> | Análisis | 45  | 35.00  | <b>1575.00</b> |
| Alquiler de Equipo de prueba de jarra  | Unid.    | 1   | 400    | <b>400.00</b>  |
| Reactivos (TiO <sub>2</sub> ), Na(OH) y H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>       | Unid.    | 1   | 500    | <b>500.00</b>  |
| <b>SERVICIOS</b>   |          |     |        |                |
| Movilidad (pasajes y gastos de transporte)                                   | Soles    | 50  | 1.50   | <b>75.00</b>   |
| SUB TOTAL  |          |     |        | <b>3043.00</b> |
| IMPREVISTOS (10%)  |          |     |        | <b>304.3</b>   |
| TOTAL (S./)  |          |     |        | <b>3347.30</b> |

#### 4.1.4 Balance de masa.

En ésta trabajo de investigación se realizó con un equipo denominado prueba de jarras donde se inoculo 0,5 g de TiO<sub>2</sub>, en una solución que contenía 500 mL de lixiviado del botadero la mejorada, con el objetivo de tomar muestras cada cierto periodo de tiempo para comprobar la degradación de la materia. A su vez, se comprobó la eficiencia del método de caracterización del lixiviado para las muestras seleccionadas. Los resultados que la misma presentó mayores variaciones de la concentración con el paso del tiempo.

#### 4.2 Discusión de resultados

Se realizó la caracterización de los lixiviados del botadero “La Mejorada” como se muestra en la tabla 4.1, los parámetros analizados DBO<sub>5</sub> y DQO indicadores de la carga orgánica son muy altos con un pH básico, superando los límites máximos permisibles estipulados en las normativas peruanas.

Se realizaron las pruebas experimentales con sus respectivas replicas para cada prueba y se obtuvieron los promedios de los resultados para tener mayor confiabilidad, las experimentos se realizaron según el diseño experimental presentado en el capítulo anterior y utilizando el equipo de prueba de jarras ayudó a obtener una mezcla completa de los compuesto de la fotocatalisis heterogénea como son el  $H_2O_2$  y  $TiO_2$ , en las siguientes tablas se visualizaran los resultados obtenidos, habiendo trabajado en los experimentos con 0,5 gramos de dióxido de titanio  $TiO_2$  de la misma manera para la radiación UV de 16 watts de potencia constante para todo los tratamientos a un tiempo de retención (TR) de 60 minutos como maximo.

Tabla 4.20 Reducción de  $DBO_5$  y DQO con 100 mg/L de  $H_2O_2$  y pH 3

| Nº | pH   | Temperatura<br>°C | $DBO_5$ | DQO     | $DBO_5/DQO$ | %<br>Reducción<br>$DBO_5$ | %<br>Reducción<br>DQO |
|----|------|-------------------|---------|---------|-------------|---------------------------|-----------------------|
| 1  | 3,01 | 15,10             | 3925,80 | 6125,30 | 0,64        | 0,0%                      | 0,0%                  |
| 2  | 3,90 | 15,50             | 2907,95 | 5268,30 | 0,55        | 25,9%                     | 14,0%                 |
| 3  | 4,58 | 15,65             | 1502,45 | 3017,05 | 0,50        | 61,7%                     | 50,7%                 |
| 4  | 5,77 | 15,90             | 726,75  | 1538,45 | 0,47        | 81,5%                     | 74,9%                 |

En la tabla 4.20 se observan los valores promedios de los resultados de las pruebas experimentales con su respectivas replicas, realizadas en un medio acido de pH 3, con una concentración de 100 mg/L de  $H_2O_2$  y 0,5 g de  $TiO_2$  el catalizador para la aceleración de las reacciones del proceso foto catalítico heterogéneo, la oxidación fotocatalítica es la destrucción de los contaminantes mediante el empleo de radiación ultravioleta que es proporcionada por dos lámparas UV de 16 W cada uno y catalizador con el objeto de formar radicales hidroxilo, los cuales tendrán el efecto oxidante sobre los contaminantes químicos. En el proceso la oxidación tiene lugar directamente en la superficie de la partícula del catalizador, es fundamental el tiempo de permanencia del catalizador y solución contaminada para el proceso de degradación de la materia orgánica presente, esto se puede

observar en la columna cuatro y cinco donde la DBO<sub>5</sub> se reduce de 3925,80 mg/L hasta 726,75 mg/L en un tiempo de 60 minutos al igual que la DQO se reduce de 6125,30 mg/L hasta 1538,45 mg/L, y el grado de biodegradabilidad va disminuyendo según va pasando el tiempo hasta el valor de 0,47; el % de Reducción de DBO<sub>5</sub> máximo fue de 81,5% y el % de Reducción de la DQO fue 74,9%.

Tabla 4.21 Reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO con 100 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH 4

| Nº | pH   | Temperatura °C | DBO <sub>5</sub> | DQO     | DBO <sub>5</sub> /DQO | % Reducción DBO <sub>5</sub> | % Reducción DQO |
|----|------|----------------|------------------|---------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | 4,05 | 15,15          | 3925,80          | 6125,30 | 0,64                  | 0,0%                         | 0,0%            |
| 2  | 4,55 | 15,45          | 3000,25          | 5349,80 | 0,56                  | 23,6%                        | 12,7%           |
| 3  | 5,08 | 15,50          | 1537,10          | 3017,25 | 0,51                  | 60,8%                        | 50,7%           |
| 4  | 5,99 | 15,75          | 712,65           | 1694,75 | 0,42                  | 81,8%                        | 72,3%           |

En la tabla 4.21 se observan los valores promedios de los resultados de las pruebas experimentales con su respectivas replicas, realizadas en un medio acido de pH 4, con una concentración de 100 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 0,5 g de TiO<sub>2</sub> el catalizador para la aceleración de las reacciones del proceso foto catalítico heterogéneo, la oxidación fotocatalítica es la destrucción de los contaminantes mediante el empleo de radiación ultravioleta que es proporcionada por dos lámparas UV de 16 W cada uno y catalizador con el objeto de formar radicales hidroxilo, los cuales tendrán el efecto oxidante sobre los contaminantes químicos, la presencia de oxígeno en el proceso de oxidación es muy importante ya que ha probado en la fotólisis la existencia de diferentes reacciones en función de la distancia a la fuente de radiación, debido a la diferente concentración de oxígeno presente. Esto se puede observar en la columna cuatro y cinco donde la DBO<sub>5</sub> se reduce de 3925,80 mg/L hasta 712,65 mg/L en un tiempo de 60 minutos al igual que la DQO se reduce de 6125,30 mg/L hasta 1694,75 mg/L, y el grado de biodegradabilidad fue disminuyendo según va pasando el tiempo hasta el

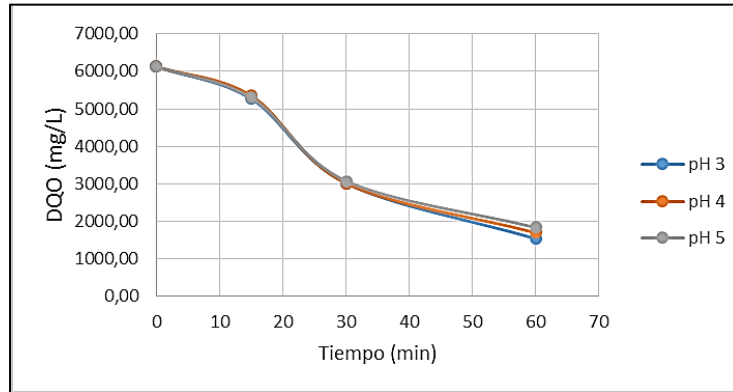
valor de 0,42; el % de Reducción de DBO<sub>5</sub> máximo fue de 81,8% y el % de Reducción de la DQO fue 72,3%.

Tabla 4.22 Reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO con 100 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH 5

| Nº | pH   | Temperatura °C | DBO <sub>5</sub> | DQO     | DBO <sub>5</sub> /DQO | % Reducción DBO <sub>5</sub> | % Reducción DQO |
|----|------|----------------|------------------|---------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | 4,99 | 15,10          | 3925,80          | 6125,30 | 0,64                  | 0,0%                         | 0,0%            |
| 2  | 5,31 | 15,25          | 3105,95          | 5296,15 | 0,59                  | 20,9%                        | 13,5%           |
| 3  | 6,06 | 15,45          | 1599,40          | 3074,20 | 0,52                  | 59,3%                        | 49,8%           |
| 4  | 6,39 | 15,70          | 858,85           | 1831,15 | 0,47                  | 78,1%                        | 70,1%           |

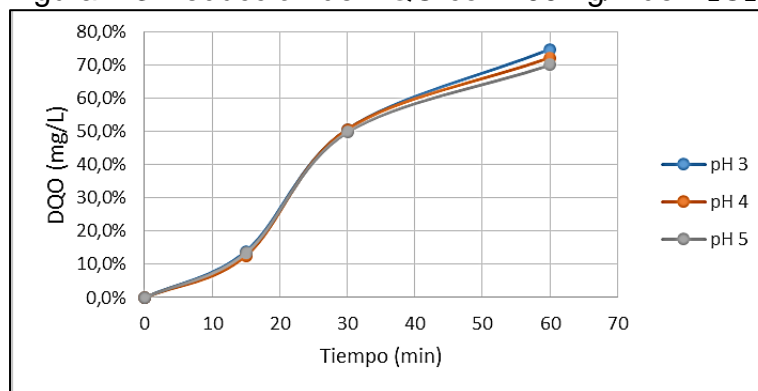
En la tabla 4.22 se observan los valores promedios de los resultados de las pruebas experimentales con su respectivas replicas, realizadas en un medio acido de pH 5, con una concentración de 100 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 0,5 g de TiO<sub>2</sub> el catalizador para la aceleración de las reacciones del proceso foto catalítico heterogéneo, la oxidación fotocatalítica es la destrucción de los contaminantes mediante el empleo de radiación ultravioleta que es proporcionada por dos lámparas UV de 16 W cada uno y catalizador con el objeto de formar radicales hidroxilo, los cuales tendrán el efecto oxidante sobre los contaminantes químicos, la presencia de oxígeno en el proceso de oxidación es muy importante ya que ha probado en la fotólisis la existencia de diferentes reacciones en función de la distancia a la fuente de radiación, debido a la diferente concentración de oxígeno presente. Esto se puede observar en la columna cuatro y cinco donde la DBO<sub>5</sub> se reduce de 3925,80 mg/L hasta 712,65 mg/L en un tiempo de 60 minutos al igual que la DQO se reduce de 6125,30 mg/L hasta 1694,75 mg/L, y el grado de biodegradabilidad fue disminuyendo según va pasando el tiempo hasta el valor de 0,42; el % de Reducción de DBO<sub>5</sub> máximo fue de 81,8% y el % de Reducción de la DQO fue 72,3%.

Figura 4.2 Reducción de DQO con 100mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



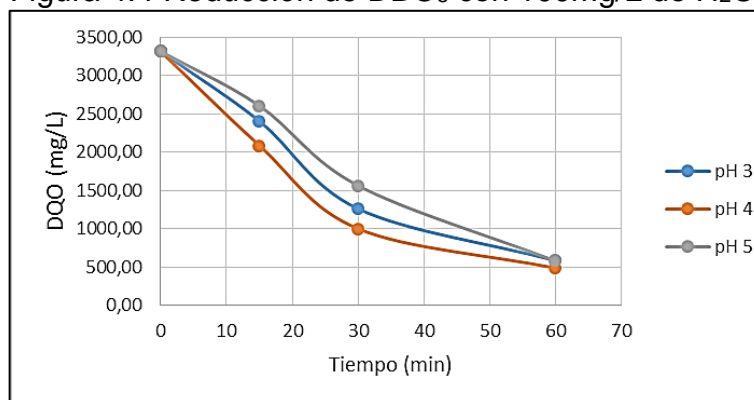
En la figura 4.2 se muestra los resultados de la reducción de carga orgánica mediante el indicador de DQO obteniéndose mayor reducción en un medio ácido de pH 3, el pH afecta las propiedades superficiales del catalizador y a la forma química del compuesto del lixiviado a degradar, y ello se manifiesta en alteraciones de la velocidad de degradación y en la tendencia a la floculación del catalizador, el pH 3 tiene mayor reducción que las otras dos pruebas debido a que el catalizador reacciona más rápido en un medio ácido y la generación de hidroxilos por el peróxido de hidrogeno que es agregado a la solución, la radiación de las UV también ayudan a la generación de hidroxilos quienes serán los agentes de la oxidación de los contaminantes, el tiempo de permanencia de contacto es indispensables para las reacciones que se dan dentro del proceso de la fotocatalisis heterogénea.

Figura 4.3 Reducción de DQO con 100mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



En la figura 4.3 se muestra los resultados del % de Reducción de carga orgánica mediante el indicador de DQO obteniéndose mayor % en un medio ácido de pH 3 con un 74,9% utilizando 100mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, en los primeros 15 minutos del tratamiento la Reducción es ligeramente baja debido a que recién se vienen mezclando completamente el catalizador con el lixiviado y las lámparas de radiación UV empiezan a irradiar con mayor frecuencia, ya en los 30 minutos se encuentra la mayor Reducción de la carga orgánica, debido a que se formaron mayor los hidroxilos gracias al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y la radiación UV, quienes actuaron como oxidantes en los contaminantes presentes en los lixiviados.

Figura 4.4 Reducción de DBO<sub>5</sub> con 100mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

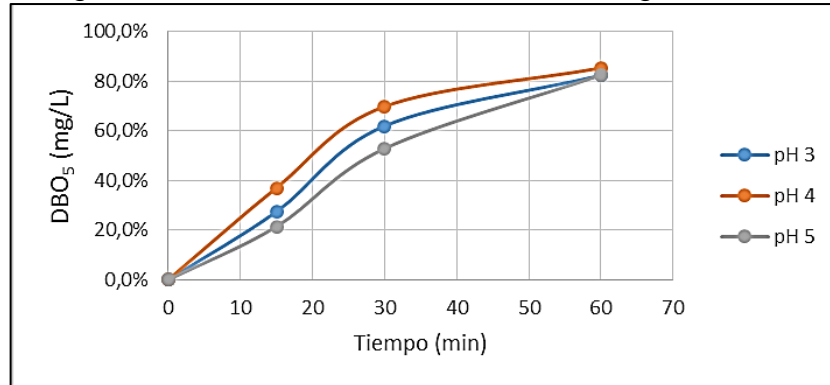


En la figura 4.4 se muestra los resultados de la reducción de la carga orgánica mediante el indicador de DBO<sub>5</sub> obteniéndose diferencias significativas en los pH distintos de operación de las pruebas experimentales mayor % en un medio ácido de pH 3 con un 74,9% utilizando 100mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, en los primeros 15 minutos del tratamiento la Reducción es ligeramente baja debido a que recién se vienen mezclando completamente el catalizador con el lixiviado y las lámparas de radiación UV empiezan a irradiar con mayor frecuencia, ya en los 30 minutos se encuentra la mayor Reducción de la carga orgánica, debido a que se formaron mayor los



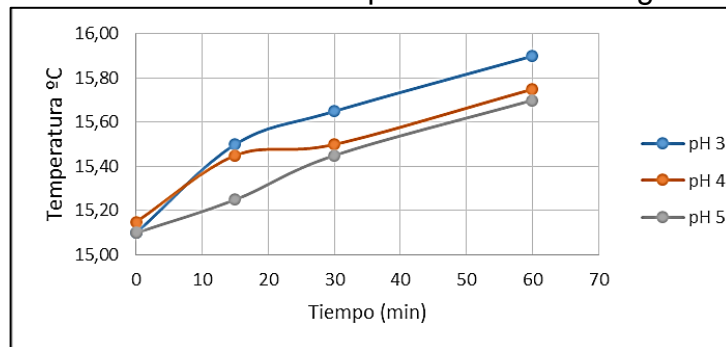
hidroxilos gracias al  $H_2O_2$  y la radiación UV, quienes actuaron como oxidantes en los contaminantes presentes en los lixiviados.

Figura 4.5 Reducción de DQO<sub>5</sub> con 100mg/L de  $H_2O_2$



En la figura 4.5 se muestra los resultados de la reducción de la carga orgánica mediante el indicador de DBO<sub>5</sub> obteniéndose diferencias significativas en los pH distintos de operación de las pruebas experimentales teniendo mayor Reducción con un medio ácido de pH 4 con un 81,8% de Reducción de DBO<sub>5</sub>, la eficiencia final de la reacción fotocatalítica depende de la radiación que determinan en definitiva el grado de oxidación total de la materia orgánica.

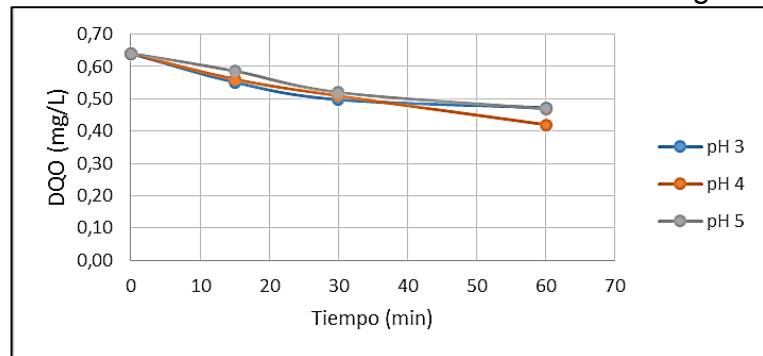
Figura 4.6 Variación de la temperatura con 100mg/L de  $H_2O_2$



En la figura 4.6 se muestra los resultados de la variación de temperatura para cada medio que se experimentó elevándose ligeramente la temperatura en 1 °C, según la teoría la temperatura no afecta mucho al proceso foto

catalítico ya que el catalizador no es afectado, Una ventaja de la fotocatalisis heterogénea es que, debido al mecanismo fotónico, no se requieren elevadas temperaturas y se opera habitualmente a temperatura ambiente.

Figura 4.7 Variación de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO con 100mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



En la figura 4.7 se muestra la variación de la relación de DBO<sub>5</sub>/DQO para cada una de los tratamientos se analizaron dicha relación obteniendo, una disminución menores a 0,5 esto nos indica que le grado de biodegradabilidad existente en los lixiviados es parcial mente biodegradable, habiendo eliminado la mayor cantidad de materia orgánica existente en el lixiviado, para los pH 3 y 5 no existe diferencia significativa con respecto al tratamiento con pH 4

Tabla 4.23 Reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO con 200 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH 3

| Nº | pH   | Temperatura °C | DBO <sub>5</sub> | DQO     | DBO <sub>5</sub> /DQO | % Reducción DBO <sub>5</sub> | % Reducción DQO |
|----|------|----------------|------------------|---------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | 3,02 | 15,30          | 3315,30          | 4988,70 | 0,66                  | 0,0%                         | 0,0%            |
| 2  | 3,77 | 15,45          | 2406,00          | 4229,85 | 0,57                  | 27,4%                        | 15,2%           |
| 3  | 4,67 | 15,75          | 1261,25          | 2350,90 | 0,54                  | 62,0%                        | 52,9%           |
| 4  | 5,92 | 15,95          | 584,60           | 1094,90 | 0,53                  | 82,4%                        | 78,1%           |

En la tabla 4.23 se observan los valores promedios de los resultados de las pruebas experimentales con su respectivas replicas, realizadas en un medio acido de pH 3, con una concentración de 200 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 0,5 g de TiO<sub>2</sub> el catalizador para la aceleración de las reacciones del proceso foto catalítico heterogéneo, El TiO<sub>2</sub> ha sido el fotocatalizador más ampliamente estudiado

en la degradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, ello es debido a que se trata de un compuesto muy estable, no tóxico, fácil de producir, barato y fotosensible a una fracción del espectro solar, el TiO<sub>2</sub> ayuda acelerar la reacción y la formación de los hidroxilos para la oxidación es así como el DBO<sub>5</sub> disminuye de 3315,30 hasta 584,60 obteniendo una máxima Reducción del 82,4% de DBO<sub>5</sub>, mientras que el DQO se reduce de 4988,70 hasta 1094,90 obteniendo el máximo de Reducción de 78,1% de DQO, y el grado de biodegradabilidad de 0,53 existiendo materia orgánica biodegradable en el lixiviado después del tratamiento.

Tabla 4.24 Reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO con 200 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH 4

| Nº | pH   | Temperatura °C | DBO <sub>5</sub> | DQO     | DBO <sub>5</sub> /DQO | % Reducción DBO <sub>5</sub> | % Reducción DQO |
|----|------|----------------|------------------|---------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | 3,99 | 15,10          | 3315,30          | 4988,70 | 0,66                  | 0,0%                         | 0,0%            |
| 2  | 4,59 | 15,35          | 2086,95          | 3935,20 | 0,53                  | 37,1%                        | 21,1%           |
| 3  | 5,51 | 15,45          | 1000,25          | 2000,65 | 0,50                  | 69,8%                        | 59,9%           |
| 4  | 6,12 | 15,70          | 486,25           | 1011,55 | 0,48                  | 85,3%                        | 79,7%           |

En la tabla 4.24 al igual que la tabla 4.23 inician con las mismas concentraciones de DBO<sub>5</sub> y DQO esto es debido a que las muestras obtenidas utilizadas son de la misma fecha de muestreo de los lixiviados obteniéndose 85,3% de Reducción de DBO<sub>5</sub> y 79,7% de Reducción de DQO, a las condiciones de un medio ácido de pH 4 y con 200mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

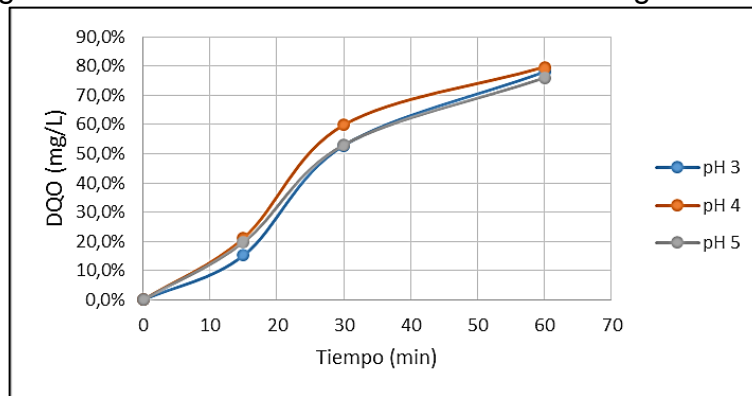
Tabla 4.25 Reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO con 200 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH 5

| Nº | pH   | Temperatura °C | DBO <sub>5</sub> | DQO     | DBO <sub>5</sub> /DQO | % Reducción DBO <sub>5</sub> | % Reducción DQO |
|----|------|----------------|------------------|---------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | 5,00 | 14,80          | 3315,30          | 4988,70 | 0,66                  | 0,0%                         | 0,0%            |
| 2  | 5,28 | 15,05          | 2606,35          | 4002,75 | 0,65                  | 21,4%                        | 19,8%           |
| 3  | 6,01 | 15,25          | 1563,35          | 2341,05 | 0,67                  | 52,8%                        | 53,1%           |
| 4  | 6,43 | 15,60          | 580,10           | 1195,60 | 0,49                  | 82,5%                        | 76,0%           |

En la tabla 4.25 se muestra el incremento de la temperatura al transcurrir el tiempo de contacto del catalizador, con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el lixiviado, mientras que la

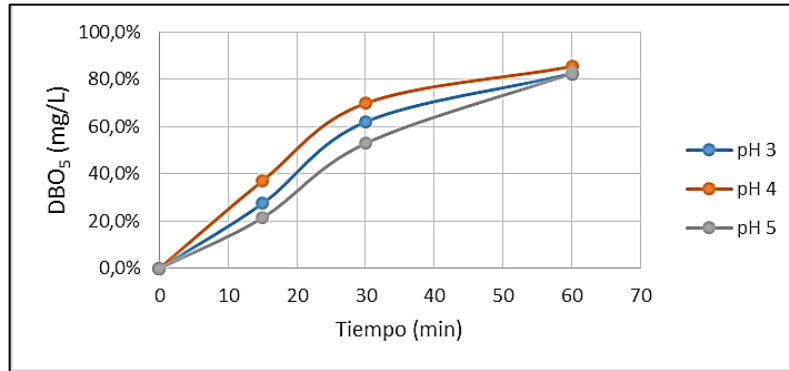
temperatura se incrementa ligeramente debido a la radiación UV que vienen proporcionando las lámparas UV, la relación de DBO<sub>5</sub>/DQO fue disminuyendo esto se debió a que el grado de biodegradabilidad fue reduciéndose en el lixiviado, por lo que se llegó como máximo al 82,5% de Reducción de DBO<sub>5</sub> y un 76% Reducción de DQO

Figura 4.8 % de Reducción de DQO con 200mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



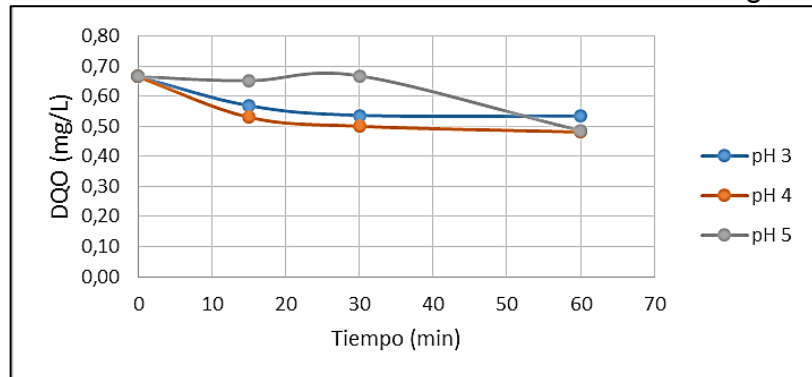
En la figura 4.8 se muestra los resultados del % de Reducción de carga orgánica mediante el indicador de DQO obteniéndose mayor % en un medio ácido de pH 4 con un 79,7% utilizando 200mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, en los primeros 15 minutos del tratamiento la Reducción es ligeramente baja debido a que recién se vienen mezclando completamente el catalizador con el lixiviado y las lámparas de radiación UV empiezan a irradiar con mayor frecuencia, ya en los 30 minutos se encuentra la mayor Reducción de la carga orgánica, debido a que se formaron mayor los hidroxilos gracias al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y la radiación UV, quienes actuaron como oxidantes en los contaminantes presentes en los lixiviados

Figura 4.9 % de Reducción de DBO<sub>5</sub> con 200mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



En la figura 4.9 se muestra los resultados de la reducción de la carga orgánica mediante el indicador de DBO<sub>5</sub> obteniéndose diferencias significativas en los pH distintos de operación de las pruebas experimentales teniendo mayor Reducción con un medio ácido de pH 4 con un 85,3% de Reducción de DBO<sub>5</sub>, la eficiencia final de la reacción fotocatalítica depende de la radiación que determinan en definitiva el grado de oxidación total de la materia orgánica.

Figura 4.10 Variación de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO con 100mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



En la figura 4.10 se muestra la variación de la relación de DBO<sub>5</sub>/DQO para cada una de los tratamientos se analizaron dicha relación obteniendo, una disminución menor a 0,55 a 0,4 esto nos indica que le grado de biodegradabilidad existente en los lixiviados es parcial mente biodegradable, habiendo eliminado la mayor cantidad de materia orgánica existente en el

lixiviado, para los pH 4 y 5 no existe diferencia significativa con respecto al tratamiento con pH 3

Tabla 4.26 Reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO con 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH 3

| Nº | pH   | Temperatura °C | DBO <sub>5</sub> | DQO     | DBO <sub>5</sub> /DQO | % Reducción DBO <sub>5</sub> | % Reducción DQO |
|----|------|----------------|------------------|---------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | 3,10 | 15,30          | 3812,10          | 5697,00 | 0,67                  | 0,0%                         | 0,0%            |
| 2  | 3,86 | 15,25          | 2610,70          | 4102,50 | 0,64                  | 31,5%                        | 28,0%           |
| 3  | 4,51 | 15,55          | 1295,45          | 2297,20 | 0,56                  | 66,0%                        | 59,7%           |
| 4  | 6,37 | 15,75          | 508,35           | 1075,85 | 0,47                  | 86,7%                        | 81,1%           |

En la tabla 4.26 se observan los valores promedios de los resultados de las pruebas experimentales con su respectivas replicas, realizadas en un medio acido de pH 3, con una concentración de 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 0,5 g de TiO<sub>2</sub> el catalizador para la aceleración de las reacciones del proceso foto catalítico heterogéneo, el empleo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> produce una mejora de la eficiencia en el proceso, no obstante, cuando la concentración es excesivamente elevada se pueden producir fenómenos de scavenging de los radicales OH o de los huecos foto-generados, asimismo, una elevada concentración promueve la adsorción competitiva entre el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y los contaminantes en la superficie del TiO<sub>2</sub> es por eso que la dosificación correcta del peróxido de hidrogeno aumenta la Reducción de la materia orgánica es así como el DBO<sub>5</sub> disminuye de 3812,10 hasta 508,35 obteniendo una máxima Reducción del 86,7% de DBO<sub>5</sub>, mientras que el DQO se reduce de 5697 hasta 1075,85 obteniendo el máximo de Reducción de 81,1% de DQO, y el grado de biodegradabilidad de 0,47 existiendo parcialmente materia orgánica biodegradable en el lixiviado después del tratamiento.

Tabla 4.27 Reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO con 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH 4

| Nº | pH   | Temperatura °C | DBO <sub>5</sub> | DQO     | DBO <sub>5</sub> /DQO | % Reducción DBO <sub>5</sub> | % Reducción DQO |
|----|------|----------------|------------------|---------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | 4,10 | 14,90          | 3812,10          | 5697,00 | 0,67                  | 0,0%                         | 0,0%            |

|   |      |       |         |         |      |       |       |
|---|------|-------|---------|---------|------|-------|-------|
| 2 | 4,61 | 15,15 | 2323,75 | 4027,20 | 0,58 | 39,0% | 29,3% |
| 3 | 5,60 | 15,40 | 1004,20 | 2101,10 | 0,48 | 73,7% | 63,1% |
| 4 | 6,59 | 15,65 | 203,10  | 703,75  | 0,29 | 94,7% | 87,6% |

En la tabla 4.21 se observan los valores promedios de los resultados de las pruebas experimentales con su respectivas replicas, realizadas en un medio acido de pH 4, con una concentración de 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 0,5 g de TiO<sub>2</sub> el catalizador para la aceleración de las reacciones del proceso foto catalítico heterogéneo, el pH aumenta ligeramente, esto indica que las moléculas del lixiviado se están degradando a sustancias posiblemente neutras. Es importante resaltar que las soluciones de carácter ácido ayudan a la adsorción del lixiviado sobre la superficie del catalizador TiO<sub>2</sub>, y favorecen así el porcentaje de Reducción de la materia orgánica en el proceso fotocatalítico, ya que a este pH también hay formación de radicales •OH. Esto se puede observar en la columna cuatro y cinco donde la DBO<sub>5</sub> se reduce de 3812,10 mg/L hasta 203,10 mg/L en un tiempo de 60 minutos al igual que la DQO se reduce de 5697,00 mg/L hasta 703,75 mg/L, y el grado de biodegradabilidad fue disminuyendo según va pasando el tiempo hasta el valor de 0,29 lo que indica que no existe carga orgánica biodegradable ; el % de Reducción de DBO<sub>5</sub> máximo fue de 94,7% y el % de Reducción de la DQO fue 87,6%.

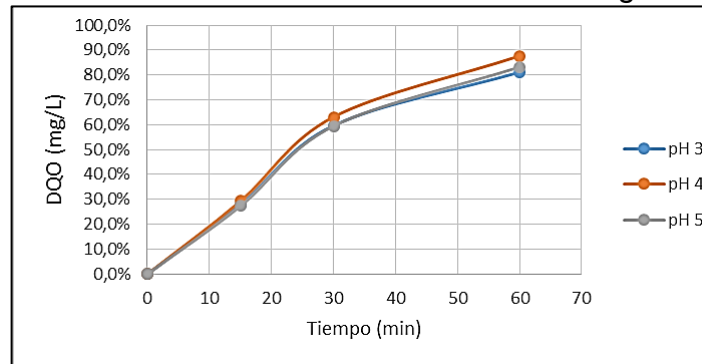
Tabla 4.28 Reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO con 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH 5

| Nº | pH   | Temperatura °C | DBO <sub>5</sub> | DQO     | DBO <sub>5</sub> /DQO | % Reducción DBO <sub>5</sub> | % Reducción DQO |
|----|------|----------------|------------------|---------|-----------------------|------------------------------|-----------------|
| 1  | 5,05 | 14,80          | 3812,10          | 5697,00 | 0,67                  | 0,0%                         | 0,0%            |
| 2  | 5,60 | 15,10          | 2649,90          | 4140,75 | 0,64                  | 30,5%                        | 27,3%           |
| 3  | 6,09 | 15,25          | 1190,15          | 2307,95 | 0,52                  | 68,8%                        | 59,5%           |
| 4  | 6,71 | 15,65          | 392,60           | 960,00  | 0,41                  | 89,7%                        | 83,1%           |

En la tabla 4.28 se muestra el incremento de la temperatura al transcurrir el tiempo de contacto del catalizador, con el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el lixiviado, mientras que la temperatura se incrementa ligeramente debido a la radiación UV que vienen

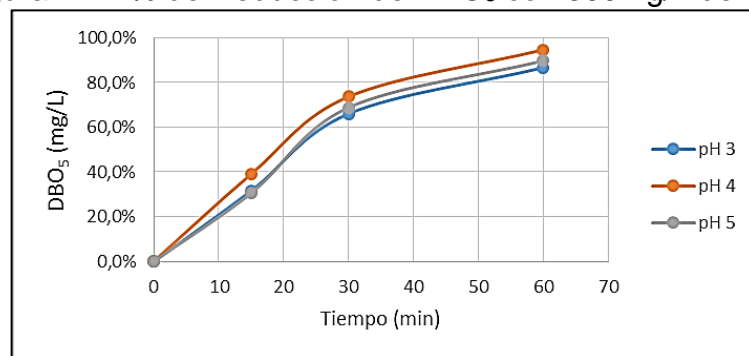
proporcionando las lámparas UV, la relación de  $DBO_5/DQO$  fue disminuyendo esto se debió a que el grado de biodegradabilidad fue reduciéndose en el lixiviado, por lo que se llegó como máximo al 89,7% de Reducción de  $DBO_5$  y un 73,1% Reducción de  $DQO$ .

Figura 4.11 % de Reducción de  $DQO$  con 300mg/L de  $H_2O_2$



En la figura 4.11 se muestra los resultados del % de Reducción de carga orgánica mediante el indicador de  $DQO$  obteniéndose mayor % en un medio ácido de pH 4 con un 87,6% utilizando 300mg/L de  $H_2O_2$ , en los primeros 15 minutos del tratamiento la Reducción ligeramente mayor debido al exceso de  $H_2O_2$  que se mezcló completamente con el catalizador y el lixiviado, las lámparas de radiación UV empiezan a irradiar con mayor frecuencia, ya en los 30 minutos la Reducción disminuyó en comparación a los primeros 15 minutos y luego para volverse constante

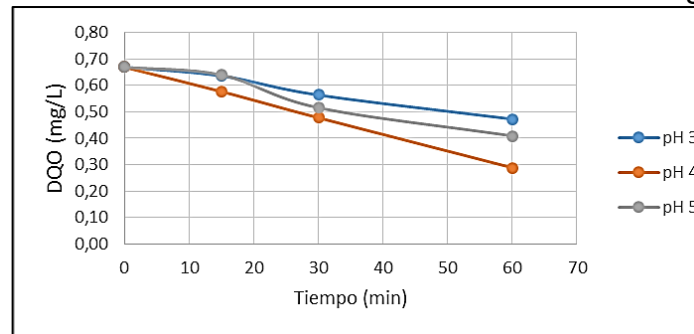
Figura 4.12 % de Reducción de  $DBO_5$  con 300mg/L de  $H_2O_2$





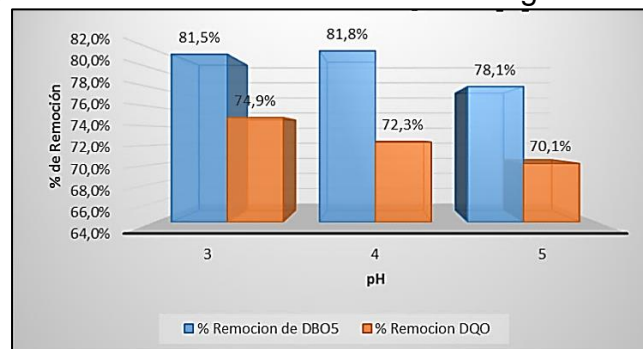
En la figura 4.12 se muestra los resultados de la reducción de la carga orgánica mediante el indicador de  $DBO_5$  obteniéndose diferencias significativas en los pH distintos de operación de las pruebas experimentales teniendo mayor Reducción con un medio ácido de pH 4 con un 94,7% de Reducción de  $DBO_5$ , la eficiencia final de la reacción fotocatalítica depende de la radiación que determinan en definitiva el grado de oxidación total de la materia orgánica.

Figura 4.13 Variación de la relación  $DBO_5/DQO$  con 300mg/L de  $H_2O_2$



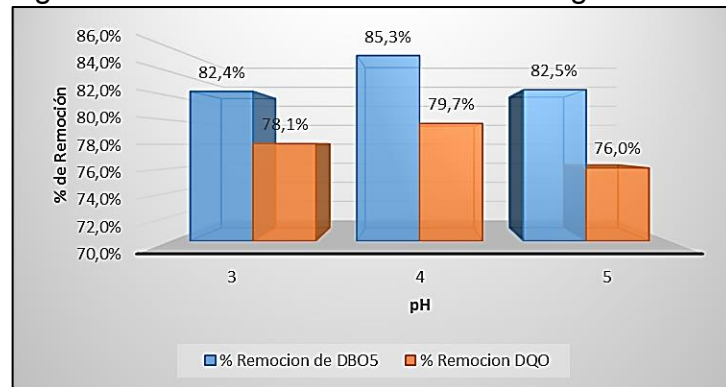
En la figura 4.13 se muestra la variación de la relación de  $DBO_5/DQO$  para cada una de los tratamientos se analizaron dicha relación obteniendo, una disminución menores a 0,5 esto nos indica que le grado de biodegradabilidad existente en los lixiviados es parcial mente biodegradable y menores de 0,3 solo persisten materia orgánica no biodegradable.

Figura 4.14 % de Reducción con 100 mg/L de  $H_2O_2$



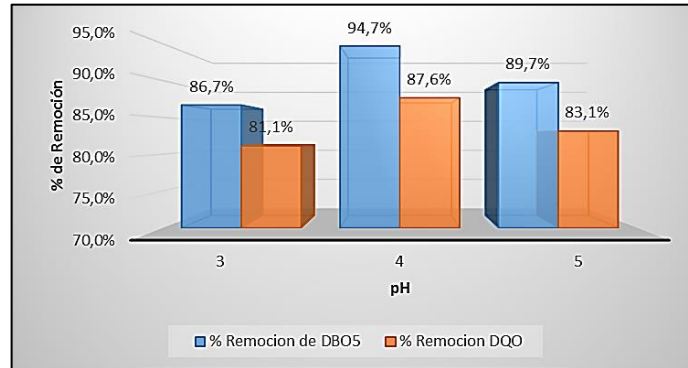
En la figura 4.14. se observan los resultados del % de Reducción de las carga orgánica con los indicadores de DBO<sub>5</sub> y DQO con una solución de 100 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en medios ácidos obteniendo la mayor Reducción con un pH de 4, esto debido al pH que afecta las propiedades superficiales del catalizador y a la forma química del compuesto a degradar, y ello se manifiesta en alteraciones de la velocidad de degradación y en la tendencia a la floculación del catalizador TiO<sub>2</sub>, obteniendo un 81,8 % de Reducción de DBO<sub>5</sub> y un 72,3% de Reducción de DQO.

Figura 4.15 % de Reducción con 200 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



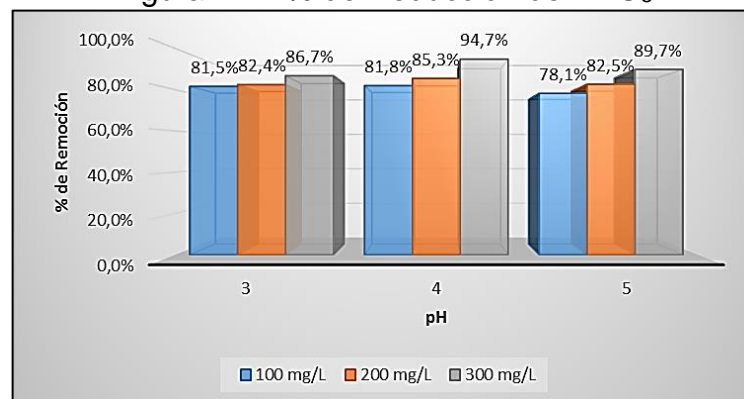
En la figura 4.15. Se observan los resultados del % de Reducción de las carga orgánica con los indicadores de DBO<sub>5</sub> y DQO con una solución de 200 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en medios ácidos obteniendo la mayor Reducción con un pH de 4, esto debido al pH que afecta las bajo las condiciones ácidas, condiciones bajo las cuales, según la literatura, se obtienen porcentajes de degradación elevados utilizando TiO<sub>2</sub> como catalizador, obteniendo un 85,3 % de Reducción de DBO<sub>5</sub> y un 79,7% de Reducción de DQO.

Figura 4.16 % de Reducción con 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>



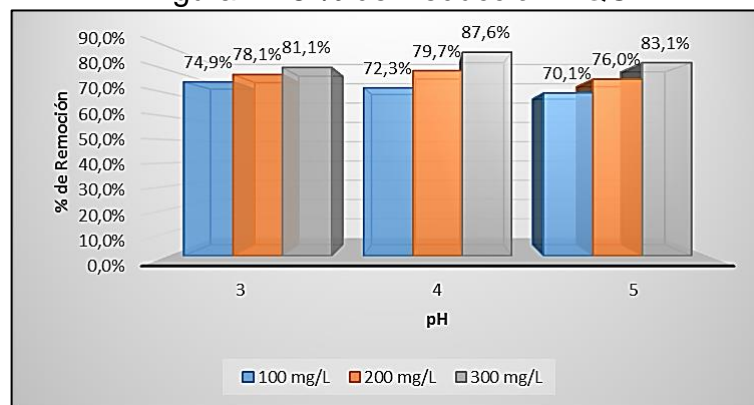
En la figura 4.15. Se observan los resultados del % de Reducción de la carga orgánica con los indicadores de DBO<sub>5</sub> y DQO con una solución de 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en medios ácidos obteniendo la mayor Reducción con un pH de 4, la mayor concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> puede disociarse formando las especies iónicas H<sup>+</sup> y HO<sup>2-</sup> (el anión perhidroxilo puede actuar como nucleófilo), y en algunas ocasiones se puede producir oxígeno y agua sin la formación de radicales hidroxilo y perhidroxilo como intermediarios. Sin embargo los valores de pH ácidos tienden a descomponer, en mayor o menor medida, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mediante la formación de radicales libres lo que ayudo a remover la carga orgánica del lixiviado obteniéndose el 94,7% de Reducción de DBO<sub>5</sub> y 87,6% de Reducción de DQO.

Figura 4.17 % de Reducción de DBO<sub>5</sub>



En la figura 4.17 se muestra las comparaciones del % de Reducción de DBO<sub>5</sub> con diferentes concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y en medios ácidos distintos, obteniendo los mayores valores de 86,7%; 94,7% y 89,7% de Reducción con 300mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> esto debido a la formación de iones hidroxilos que ayudan a la oxidación de los contaminantes de los lixiviados y de igual manera la radiación UV de las lámparas quienes aceleran a la descomposición del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Figura 4.18 % de Reducción DQO



En la figura 4.18 se muestra las comparaciones del % de Reducción de DQO con diferentes concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y en medios ácidos distintos, obteniendo los mayores valores de 81,1%; 87,6% y 83,1% de Reducción con 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> esto debido a la formación de iones hidroxilos que ayudan a la oxidación de los contaminantes de los lixiviados y de igual manera la radiación UV de las lámparas quienes aceleran a la descomposición del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

### 4.3 Contrastación de Hipótesis

#### One-way ANOVA: % de Remocion de DQO versus pH

Null hypothesis All means are equal  
 Alternative hypothesis At least one mean is different  
 Significance level  $\alpha = 0,05$   
 Equal variances were assumed for the analysis.  
 Factor Information

| Factor | Levels | Values  |
|--------|--------|---------|
| pH     | 3      | 3; 4; 5 |

| Analysis of Variance |    |         |         |         |         |
|----------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Source               | DF | Adj SS  | Adj MS  | F-Value | P-Value |
| pH                   | 2  | 44,6581 | 22,3291 | 151,25  | 0,001   |
| Error                | 3  | 0,4429  | 0,1476  |         |         |
| Total                | 5  | 45,1010 |         |         |         |

**Interpretación:** Se realizó el análisis estadístico con el software Minitab 17, se utilizó el ANOVA de TUKEY, ingresando los datos del % de Reducción de DQO como respuesta del tratamiento de los lixiviados por el proceso de fotocátalisis en medios ácidos, resultando el valor P-value = 0,001 siendo menor al valor de significancia del 0,05; según este resultado podemos rechazar la hipótesis que la variación de la acides no influyen significativamente en la Reducción de DQO de los lixiviados, por lo tanto se aceptara la hipótesis alterna que si existe diferencia significativa en la Reducción de DQO con la variación de la acides en el proceso de fotocátalisis heterogéneo.

| Model Summary |          |        |           |            |
|---------------|----------|--------|-----------|------------|
|               | S        | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|               | 0,384231 | 99,02% | 98,36%    | 96,07%     |

| Means                   |   |         |        |           |          |
|-------------------------|---|---------|--------|-----------|----------|
| pH                      | N | Mean    | StDev  | 95% CI    |          |
| 3                       | 2 | 81,115  | 0,559  | ( 80,250; | 81,980)  |
| 4                       | 2 | 87,645  | 0,361  | ( 86,780; | 88,510)  |
| 5                       | 2 | 83,1500 | 0,0283 | (82,2854; | 84,0146) |
| Pooled StDev = 0,384231 |   |         |        |           |          |

### Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

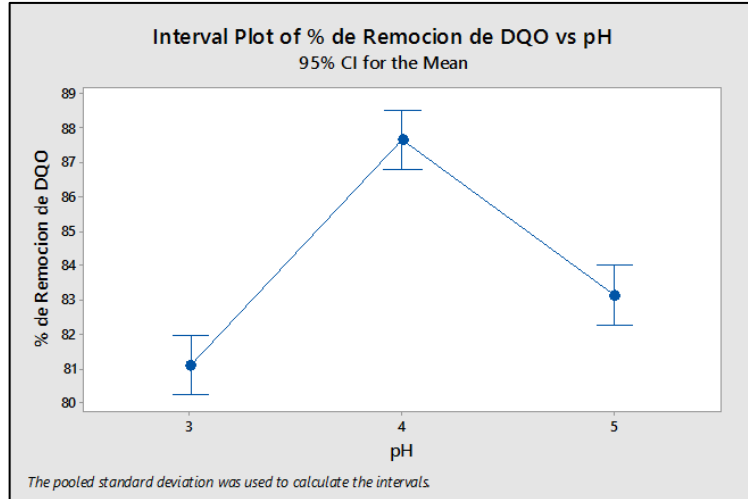
| pH | N | Mean    | Grouping |
|----|---|---------|----------|
| 4  | 2 | 87,645  | A        |
| 5  | 2 | 83,1500 | B        |
| 3  | 2 | 81,115  | C        |

Means that do not share a letter are significantly different.

**Interpretación:** Se realizó la comparación de Tukey con el software Minitab 17 con los análisis obtenidos de DQO y se observó según las medias calculadas que existen tres grupos A, B y C esto nos indica que si existe

diferencia significativa para los medios ácidos de tratamiento en la Reducción de DQO de los lixiviados del botadero “La Mejorada”

Figura 4.19 Interval Plot of % de Reducción de DQO vs pH



En la Figura 4.19 Se observa que la diferencia de las medias es significativa y los intervalos de confianza se encuentran distantes, la DQO esta relacionada a pH por lo tanto se puede afirmar que existe diferencias entre medios ácidos para el tratamiento de lixiviados.

## CONCLUSIONES

- Se caracterizó fisicoquímicamente el lixiviado del botadero La Mejorada del distrito de El tambo obteniendo 3859,5 mg/L de DBO<sub>5</sub>; 5677,8 mg/L de DQO; 5208 mg/L –CaCO<sub>3</sub> de Dureza Total; 7315 mg/L – CaCO<sub>3</sub> de Alcalinidad Total; 8,94 unidades de pH; 5789  $\mu$ s/cm de conductividad y 8561 unidades de solidos totales
- Se evaluó el efecto de la dosificación de 0,5 g del catalizador TiO<sub>2</sub> en combinación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en medios ácidos, teniendo como resultado la mayor disminución de DBO<sub>5</sub> de 3812,10 mg/L a 203,10 mg/L a las condiciones de 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en un medio ácido de pH 4 y de igual manera para la DQO de 5697,00 mg/L a 703,75 mg/L a las condiciones de 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en un medio ácido de pH 4, el tratamiento se realizó a mezcla completa con 100 RPM del equipo de pruebas de jarra, mediante el proceso de fotocátalisis heterogénea.
- Se determinó la reducción de la materia orgánica mediante el parámetro de DQO obteniendo el 74,9% en medio ácido en pH 3 con 100 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, el 79,7% en medio ácido en pH 4 con 200 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y el 87,6% en medio ácido en pH 4 con 300 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> siendo esta las condiciones más para el tratamiento del lixiviado mediante el proceso de fotocátalisis heterogénea con radiación UV.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda emplear la energía solar a cambio de la energía eléctrica en la aplicación de las lámparas UV para la eliminación de contaminantes en lixiviados mediante el uso de un fotocatalizador adecuado.
- Se recomienda hacer los estudios de fotocatálisis para la degradación de materia orgánica de lixiviados en medios básicos.
- Se recomienda realizar estudios con respecto al cambio de catalizadores en los procesos de fotocatálisis heterogénea.
- Se recomienda realizar estudios previos de diagnóstico social y ambiental.
- Se recomienda realizar análisis pre y post del tratamiento con análisis de laboratorio, en cuanto a parámetros e indicadores.
- Se recomienda trabajar en condiciones inalterables a la realidad del estudio.
- Se recomienda realizar el proceso de oxidación por separado, como muestra previa al proceso propiamente dicho.
- Se recomienda usar dicho proceso para casos de contaminación severa, con aplicación adecuada para no alterar de forma inapropiada.
- Se recomienda usar indumentaria adecuada al procedimiento de manipulación de contaminantes y reactivos químicos.
- Se recomienda usar herramientas estadísticas con rango de error mínimo por debajo de 0.05.



## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, A., & Suárez, G. (2006). Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario “El Guayabal” de la ciudad San José de Cúcuta. *Ingeniería y Desarrollo*, 95-105.
- Andrés , P., & Cortijo, M. . (2000). Stabilization of leachates from municipal solid waste landfill by sedimentation. *J. Env. Se. andhealth*, 883-897.
- Andrés, M. (2001). *Caracterización y tratamiento de lixiviados de residuos sólidos urbanos de la Comunidad de Madrid*. España: Tesis Doctoral, E.T.S. de Ingenieros de Montes.
- Anpo, M., & Yamashita , M. (1996). Wiley Ser. Photosci. Photoeng. *Surface Photochemistry*, 117-164.
- Bacardit, J. (2007). *Coupled photochemical-biological system to treat biorecalcitrant wastewaters*. España: Tesis doctoral Universidad de Barcelona.
- Bendz, D. S. (1997). Accumulation of water and generation of leachate in a young landfill.
- Blanco , J., & Malato, S. (1994). Proceedings of Int. Conf. on Comparative Assesments of Solar Power Technologies. *SolarPACES Ed. Jerusalem, Israel*, 231-246.
- Borzacconi, L. 1. (1999). Anaerobic-aerobic treatment of municipal solid waste leachate. *Environmental Technology*, 211-217.
- Brown., S. J., & Gilí, P. A. (2000). Metal removal fiom wastewater using peat. *Water Research*, 3907-3916.
- Bueno, J. S. (1997). *Contaminación e ingeniería Ambiental, Degradación del suelo y Tratamiento de Residuos*. Ficyt, Oviedo .
- Curco, D., Malato, S., & Giménez, J. (1996). Solar Energy Materials and Solar Cells. 199-217.

- Gogate , P. R., & Pandit , A. B. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Advances in Environmental Research* 8, 553 - 597.
- Gruttadauria, M., & Liotta, F. (2009). Journal of Hazardous. *Materials* 162, 588–606.
- Gulkaya , I., Sumce , G. A., & Dilek, F. B. (2006). Importance of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup> ratio in Fenton's treatment of a carpet dyeing wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 136, 763 - 769.
- Gutiérrez, L., Melgoza, A., Alarcón, M., Ortega, J., Prado, D., & Cedillo, M. (2011). Germinación del girasol silvestre (*Helianthus annuus*) en presencia de diferentes concentraciones de metales. *Latinoam Biotecnol Amb Algal* .
- Heng, A., Nikraz, H., & Tse Hung, Y. (2010). Influence of waste age on landfill leachate quality. *International Journal of Environmental Science and Development*.
- Herry R, M. D. (2000). Particle size and clogging of granular media permeated with leachate. *J. Geot. Geo*, 775-786.
- Hipólito, J. L.-., (1996). Comparison of anaerobic treatment of leachates from an urban-solidwaste landfill at ambient temperature and at 35 °C. *Bio. Tec*, 273-277.
- Hoilijoki, T. ,. (2000). Nitrification of anaerobic pretreated municipal landfill leachate at low temperature. 1435-1446.
- Hontoria, J. M. (2000). Fundamentos del Manejo de los Residuos Urbanos. 84- 87,321-323.
- Housecroft, C., & Unidos, S. A. (2005). *Inorganic Chemistry*. Estados: Prentice Hall.
- Jaramillo Páez, C., & Taborda Ocampo, G. (2006). La Fotocatálisis: Aspectos Fundamentales para la Buena Reducción de Contaminantes. *Universidad de Caldas*, 71-88.

- Kang , J. W., Chaplin, D. H., & Glase, F. E. (1987). The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Science & Engineering* 9, 335 - 352.
- Narváez Campo , L. (2012). *Aplicación de la Fotocatálisis Heterogénea Solar para la Degradación de Residuos Farmacéuticos en Efluentes Líquidos*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Pirkanniemi , K., & Sillanpää , M. (2002). Heterogeneous water phase catalysis and environmental application: a review. *Chemosphere* 48., 1047-1060.
- Pouloupoulos, S. G., & Arvanitakis , F. (2006). Photochemical treatment of phenol aqueous solutions using ultraviolet radiation and hydrogen peroxide. *Journal of Hazardous Materials* 129, 64 - 68.
- Primo, O. (2008). *Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada*. España: Universidad de Cantabria.
- Rios , L. A., & Felipe Montoya, J. (2008). Evaluación del Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales Industriales Empleando Energía Solar. *Universidad de Antioquia. Medellín*, 46-57.
- Roger Iván Méndez Novelo, R. B. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. *Ingeniería e Investigación* , 180-185.
- Salazar, L., & Saavedra, I. (2009). Tratamiento de lixiviados, casos prácticos en diferentes temperaturas. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Universidad del Norte*, 1-15.
- Sastre, H., & Lavin, A. J. (1997). Contaminación e Ingeniería Ambiental. Degradación del suelo y Tratamiento de Residuos. *Ficyt. Oviedo*, 223-250.

## ANEXOS

### ▪ DIAGNÓSTICO SOCIO AMBIENTAL DEL BARRIO LA MEJORADA

**La Mejorada** es una zona donde se han dispuesto al aire libre por más de 10 años (antes del año 2006) residuos sólidos en un área aproximada de 02 has; la misma que la Municipalidad Distrital identificó el año 2005, para su recuperación y uso para el confinamiento de residuos sólidos en situación de emergencia.

Así mismo se cuenta con la **anuencia social** de la población del sector, para realizar el tratamiento de residuos sólidos del ámbito del distrito de El Tambo.

Cabe resaltar que para dar estabilidad e impermeabilidad a la zona se viene trabajando en coordinación con ALA – Mantaro las estructuras de defensa ribereña colindantes a las celdas de confinamiento existentes; lo que garantizará la minimización de impactos negativos y vulnerabilidad de la zona.

De la evaluación técnica realizada al lugar se ha determinado que a la fecha se cuenta con un área de 3880.02 metros cuadrados con una capacidad de recepción de 25,000 metros cúbicos de residuos con un tiempo de vida útil estimado en 90 días, en su primera etapa tal como se puede apreciar en el plano adjunto al presente.

Las acciones inmediatas a tomar son:

- Solicitud de anuencia social por parte de la población del Barrio la Mejorada para inicio de implementación del Área de Tratamiento de Residuos Sólidos La Mejorada.

#### **ESTRATEGIA:**

Reunión llevada a cabo entre representantes, población en general del barrio y Alcalde de la Municipalidad Distrital de El Tambo y

equipo técnico a fin de poner en agenda la problemática del distrito y solicitar anuencia social a fin de superar la dificultad.

- Elaboración de documento de estado situacional de Área destinada para el tratamiento La Mejorada.

**ESTRATEGIA:**

Inspección in situ con levantamiento de información pertinente con apoyo de personal técnico y operario del área en implementación.

- Implementación del área de Tratamiento de Residuos Sólidos La Mejorada.

**ESTRATEGIA:**

Dotación de personal técnico, operario para la puesta en marcha así como dotación de materiales y maquinaria destinada a la implementación.

- Elaboración de expediente para el Área de Tratamiento de residuos.

**ESTRATEGIA:**

Participación prioritaria y activa de la gerencia de Obras de la Municipalidad Distrital de El Tambo

- Implementación de defensa ribereña para el Área de tratamiento de residuos.

**ESTRATEGIA**

Coordinación pertinente con el ALA Junín para efectos del inicio de obra.

Dotación de presupuesto, personal técnico operario y maquinaria a fin de realizar defensa ribereña.

- Elaboración de expediente para defensa ribereña del área de tratamiento de residuos.

**ESTRATEGIA**

Participación prioritaria y activa de la gerencia de Obras de la Municipalidad Distrital de El Tambo

- Trabajo de sensibilización en la población de influencia directa e indirecta hacia el Área de tratamiento de residuos sólidos.

### **ESTRATEGIA**

Coordinar acciones con las Autoridades del Barrio la Mejorada.

Coordinar acciones con población del Distrito de El Tambo.

Inicio de Programa de segregación en fuente y prosecución de labores de sensibilización en los barrios piloto.

#### **a. ACCION DE MEDIANO PLAZO**

Paralelo a las actividades de una atención inmediata en el recojo de residuos de los puntos críticos con el apoyo de maquinaria, personal de planta y jóvenes CALEB 6.0 de la Iglesia Adventista del Séptimo Día, la Municipalidad Distrital de El Tambo, viene desarrollando e implementando Expediente técnico para el Área de Tratamiento La Mejorada, así como el Expediente técnico para defensa ribereña del área de tratamiento de los residuos sólidos La Mejorada.

- Así mismo se prevé la Prosecución en trabajos de coordinación y sensibilización Anexo de Cochas Chico.

### **ESTRATEGIA**

Prosecución de coordinaciones para talleres de sensibilización y participación ciudadana a través de las autoridades del Anexo de Cochas Chico y Gerencia de Desarrollo Social y Ambiental de la Municipalidad Distrital de El Tambo para continuar con la solución definitiva a los residuos sólidos con el proyecto de “Planta Mecanizada de Tratamiento y Disposición final de Residuos Sólidos del Distrito de El Tambo”.

- ESTRATEGIAS DE MINIMIZACIÓN DE RIESGO

a) **Tratamiento biológico**

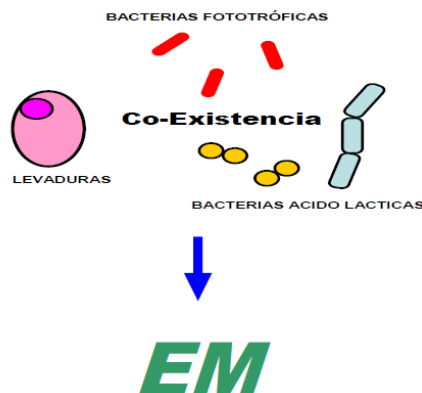
**Características de los microorganismos eficientes (EM)**

El principio fundamental de esta tecnología es la introducción de un grupo de microorganismos beneficios para mejorar las condiciones del suelo, suprimir putrefacción (incluyendo enfermedades) microbios y mejorar la eficiencia del uso de la materia orgánica por las plantas.

Las investigaciones muestran que inoculación de EM al ecosistema del suelo/planta mejora la calidad y salud del suelo, y también ayuda a controlar los diferentes patógenos presentes en el suelo.

El EM ayuda al proceso de descomposición de materia orgánica y durante la fermentación produce ácidos orgánicos que normalmente no están disponible como: ácidos lácticos, ácidos acéticos, aminoácidos, aminoácidos y ácidos málicos, sustancia bioactivas y vitaminas. Un ingrediente primordial en este proceso es la materia orgánica que es suministrada por el reciclado de residuos de los cultivos, materia verde y desechos animales. Asimismo, este proceso lleva a un incremento de humus en el suelo.

Las bacterias de ácido láctico, en un importante microorganismo del EM, al tener el potencial de suprimir microbios patógenos directa e indirectamente por la producción de actinomicetos. También se conoce que el efecto antioxidante del EM mejora el sistema inmunológico de plantas y animales.



Los microorganismos presentes en el EM son bacterias foto trópicas, bacterias ácido láctico y levaduras.



BACTERIAS FOTOTROPICAS



BACTERIAS ACIDO LACTICAS



LAVADURAS

### **Facultades de los EM para el tratamiento de los residuos sólidos Municipales**

El EM puede aumentar considerablemente los efectos de descomposición de la materia orgánica, acelerando su proceso y minimizando los olores de putrefacción.

Se entiende que en los residuos sólidos municipales acopiados en el Distrito de El Tambo, en su contenido hay un 60 % de materia orgánica según su actualización de estudio de caracterización 2014, por tanto el suministro de estos EM aceleran los procesos de descomposición.

### **Suministro de los EM en el tratamiento de los residuos solidos**

Realizado por parte de los operarios en dos horarios por día primera proporción a las 10: am, la aplicación del M3 y la otra proporción es a las 3: pm.

Donde posteriormente al suministro del EM, se cubre los residuos sólidos con polietileno de 0.05 de espesor para ganar calor interno, así los microorganismos consolidan un crecimiento logarítmico para mayor eficiencia en corto plazo de activación y tratamiento.

### **DENSIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS**

En este pazo del manejo de residuos sólidos se está utilizando el rodillo (maquina motorizada) y con un apoyo de personal con compactador mecánico



(patito), que densifica los residuos para compaginar y luego hacer la respectiva disposición en el área correspondiente.

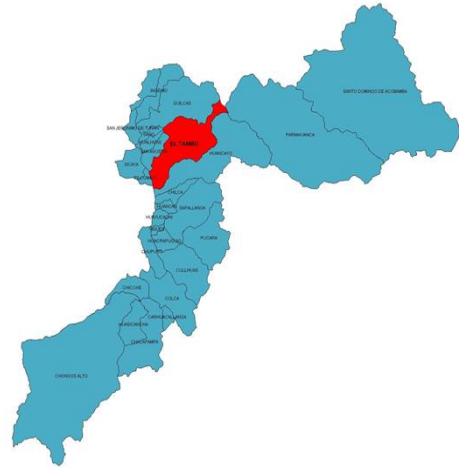
- b) Adecuación del área de disposición de los residuos sólidos municipales con las condiciones técnicas en similitud a un relleno sanitario.**

**HABILITACION DEL AREA DEL TRABAJO:** Este trabajo lo realiza el tractor oruga mediante la realización de las celdas y para luego la cobertura correspondiente, en lo cual también participan las demás maquinarias como el cargador frontal en el rpiado y aglomeración de la basura, y el volquete de limpieza con el traslado de la cobertura.

## UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL BOTADERO “LA MEJORADA”



DEPARTAMENTO DE JUNÍN



PROVINCIA DE HUANCAYO – DISTRITO DEL TAMBO



BOTADERO “LA MEJORADA”

## CARACTERÍSTICAS DEL BOTADERO “LA MEJORADA”



VÍAS DE ACCESO HABILITADA



ENCAUSAMIENTO DEL RIO MANTARO



INSTALACIÓN DE TUBERÍA DE DRENAJE PARA LOS LIXIVIADOS

PESO DEL CATALIZADOR PARA LA FOTOCATALISIS HETEROGENEA (  $TiO_2$  )



DISOLUCIÓN DEL ACIDO SULFURICO A 0.1 N



MEZCLA HOMOGENEA DEL ACIDO SULFURICO



ALIMENTACIÓN DE LIXIVIADO A LOS VASOS DE PRECIPITACION



ACIDIFICACIÓN DE LOS LIXIVIADOS



LIXIVIADOS ACIDIFICADOS A pH 3, 4 y 5.



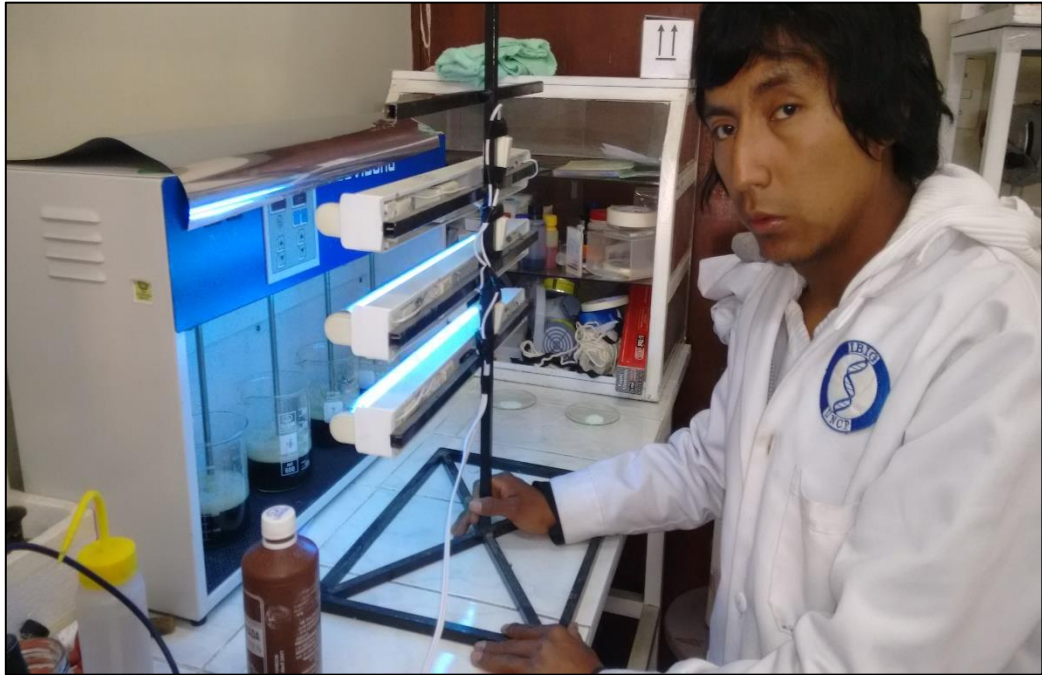
ADICIÓN DE PEROXIDO DE HIDROGENO A CADA MUESTRA.



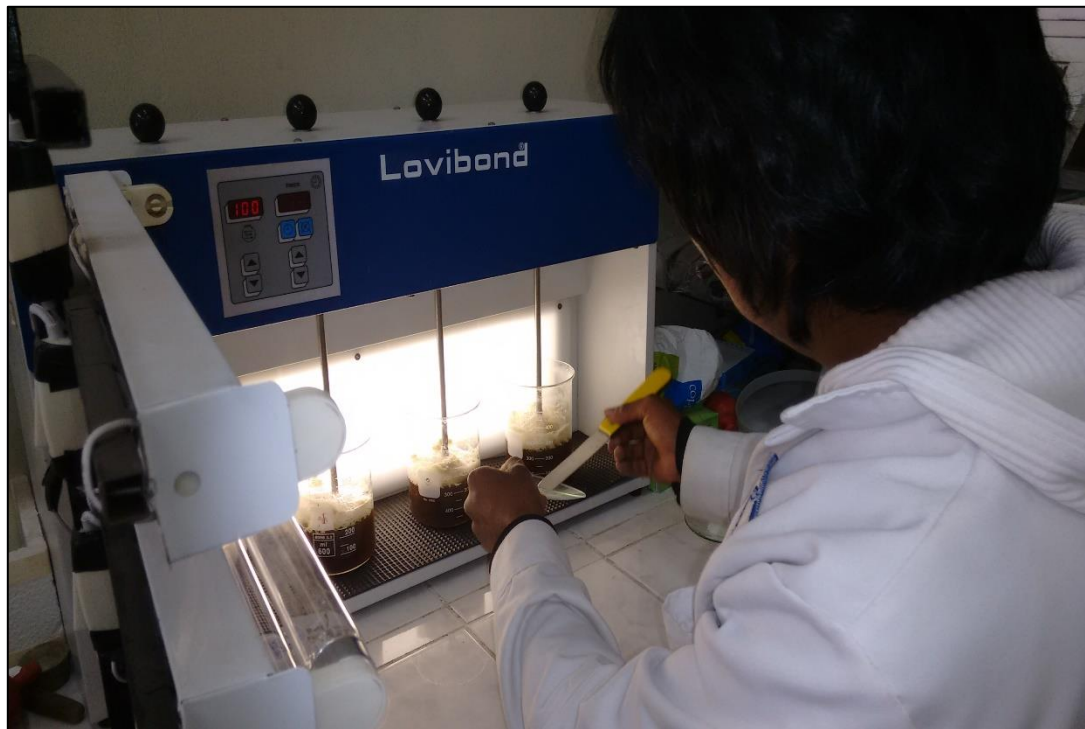
INSTALACIÓN PARA LA PRUEBA DE JARRAS



UTILIZACIÓN DE LAMPARAS UV PARA EL PROCESO FOTOCATALITICO



ADICIÓN DEL CATALIZADOR EN LAS MUESTRAS





## RECUBRIMIENTO DE LAS LAMPARAS UV PARA EVITAR DAÑOS



MEZCLA COMPLETA DE LOS COMPUESTOS DEL PROCESO FOTOCATALITICO, MEDIANTE PRUEBA DE JARRAS



COMPARACION DE RESULTADOS 1, DESPUES DE LA SEDIMENTACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS



COMPARACION DE RESULTADOS 2, DESPUES DE LA SEDIMENTACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS



PLANOS TOPOGRÁFICOS DE “LA MEJORADA”