

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL**



**REDUCCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA EN LIXIVIADO ESTABILIZADO DEL**  
**BOTADERO MUNICIPAL DE SAN RAMÓN MEDIANTE OXIDACIÓN**  
**AVANZADA FOTO-FENTON**

**TESIS**

**Para optar el título de:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**MAYORCA MALPARTIDA, Nelly Magaly**

**Tingo María – Perú**

**2017**



**T**  
**AMB**

**Mayorca Malpartida, Nelly Magaly**

Reducción de la carga orgánica en lixiviado estabilizado del botadero municipal de San Ramón mediante oxidación avanzada foto- fenton.

129 páginas; 58 cuadros; 36 figuras.; 27 ref.; 30 cm.

Título Profesional (Ingeniero Ambiental) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Recursos Naturales Renovables - 2017

- |                             |                               |                       |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| <b>1. LIXIVIADO</b>         | <b>2. OXIDACIÓN AVANZADA</b>  | <b>3. FOTO-FENTON</b> |
| <b>4. FOTOCATÁLISIS</b>     | <b>5. BOTADERO MUNICIPAL</b>  |                       |
| <b>6. RELLENO SANITARIO</b> | <b>7. CAPTADOR PARABÓLICO</b> |                       |



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
Tingo María – Perú



**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 11 de Diciembre de 2017, a horas 8:15 a.m. en la Sala de Conferencias de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, para calificar la Tesis titulada:

### **REDUCCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA EN LIXIVIADO ESTABILIZADO DEL BOTADERO MUNICIPAL DE SAN RAMÓN MEDIANTE OXIDACIÓN AVANZADA FOTO - FENTON**

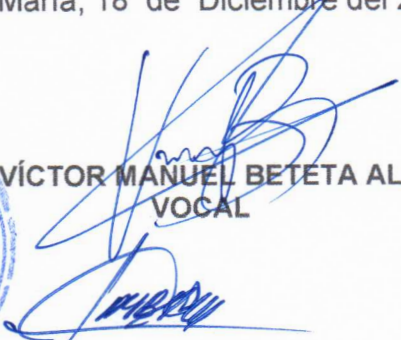
Presentado por la Bachiller **MAYORCA MALPARTIDA Nelly Magaly**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADA** con el calificativo de **“MUY BUENO”**


En consecuencia, la sustentante queda apta para optar el Título de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del Título correspondiente.

Tingo María, 18 de Diciembre del 2017

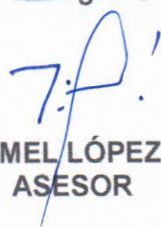
  
Dr. LUIS EDUARDO ORE CIERTO  
PRESIDENTE



  
Ing. MSc. VÍCTOR MANUEL BETETA ALVARADO  
VOCAL

  
Blgo. CÉSAR AUGUSTO GOZME SULCA  
VOCAL

  
Ing. MSc. JOSÉ ANTONIO BLAS MATIENZO  
ASESOR

  
Dr. ANTONIO EMEL LÓPEZ VILLANUEVA  
ASESOR



## DEDICATORIA

A Dios todopoderoso; quien mediante la guía del Espíritu Santo me acompaña siempre y me regala las fuerzas necesarias para salir adelante. Dejo en sus manos mi vida y mis sueños según su propósito.

A mis queridos padres Marco Antonio Mayorca Villanueva y Nelly Angélica Malpartida Capcha por la vida, por los valores que inculcaron en mí, por el ejemplo admirable de vida, por el apoyo emocional y por su gran amor incondicional. Gracias a ustedes sé que nada es imposible.

A mis hermanos Jhony, Luis, Kevin, David y Fabiana Mayorca Malpartida, por el gran cariño y amor que me regalan en casa. Y por último, me dedico este trabajo, por lo orgullosa que me siento de mi. ¡Bien hecho Nelly, eres increíble!

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi alma mater Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables y plana docente, por la contribución en mi formación como profesional.

Al Ing. José Luis Paredes Salazar, por sus enseñanzas, orientación y amistad que me brindó en el tiempo de planteamiento e inicio de esta investigación, como también durante el proceso de mi formación profesional.

Al Dr. Antonio Emel Lopez Villanueva, por su paciencia, exigencia y apoyo durante esta investigación.

Al Ing. Jose Antonio Blas Matienzo por su orientación y apoyo que me brindó durante esta investigación.

Al Ing. Richard Sias Rodríguez, por su apoyo, orientación, amistad y colaboración para realizar el presente trabajo de investigación.

A mis compañeros (as): Gian Marco, María de los Ángeles, Yesica Santamaria, Juan Alcedo, Claudia León por su apoyo de diversas maneras durante la realización de esta tesis.

A mis abuelos Nemecia Capcha, Amadeo Bravo, María Villanueva, tíos y familiares que estuvieron siempre pendientes en el proceso de mi formación profesional y en la culminación de esta investigación.

A mis amigos Edgar Enciso, Emily Correa, Nicolaza, Alfredo Ortiz, Doris Porras, Jhoana Ibarra y al P. Alfonso Tapia por su amistad sincera, consejos y ánimos durante mi formación profesional.

## ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Objetivos .....	4
1.1.1.	Objetivo general.....	4
1.1.2.	Objetivos específicos .....	4
II.	REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
2.1.	Disposición final de residuos sólidos en el Perú.....	5
2.1.1.	Rellenos Sanitarios .....	6
2.1.2.	Clasificación de rellenos sanitarios .....	7
2.1.3.	Instalaciones mínimas de un relleno sanitario.....	7
2.1.4.	Botaderos a cielo abierto .....	8
2.1.5.	Botadero municipal San Juan de Tulumayo Alto, San Ramón, Chanchamayo .....	9
2.2.	Generación de lixiviado .....	12
2.2.1.	Definición de lixiviado.....	12
2.2.2.	Composición y características del lixiviado .....	13
2.2.3.	Microorganismos en los lixiviados.....	17
2.3.	Proceso de oxidación avanzada.....	17
2.3.1.	Investigaciones experimentales en procesos de oxidación avanzada .....	19

2.3.2.	Reacción Foto-Fenton.....	22
2.3.3.	Reactividad del radical hidroxilo.....	26
2.3.4.	Factores que influyen en el proceso foto-Fenton .....	28
2.4.	Reactores solares para fotocatalisis.....	30
2.4.1.	Radiación solar .....	30
2.4.2.	Instalaciones experimentales en fotocatalisis solar.....	32
2.4.3.	Tipo de reactores solares.....	33
2.4.3.1.	Reactores cilindro-parabólicos.....	33
2.4.3.2.	Reactores solares sin concentración .....	34
2.4.3.3.	Reactores cilindro-parabólico compuesto (CPCS).....	34
2.4.4.	Parámetros limitantes de diseño .....	35
2.4.4.1.	Disposición del catalizador .....	35
2.4.4.2.	Iluminación y concentración de catalizador .....	35
2.4.4.3.	Tiempo de residencia.....	36
2.4.5.	Materiales para diseños de reactores .....	36
2.4.5.1.	Superficie reflectante .....	37
2.4.5.2.	Fotorreactor .....	38
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	39
3.1.	Ubicación.....	39
3.2.	Materiales y equipos.....	39
3.2.1.	Materiales.....	39

3.2.2. Equipos .....	40
3.3. Métodos.....	40
3.3.1. Muestreo y caracterización de lixiviado.....	41
3.4. Descripción del Reactor .....	42
3.5. Relaciones molares de Fe: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	42
3.6. Análisis de los parámetros físico-químicos y microbiológicos .....	42
3.6.1. Radiación .....	42
3.6.2. Índice de oxidabilidad al permanganato – UNE-EN ISO 8467, comité técnico AEN/CTN 77- AENOR.....	43
3.6.3. Temperatura - Método electrométrico .....	43
3.6.4. Determinación del potencial de hidrógeno .....	43
3.6.5. Conductividad - Método electrométrico.....	44
3.6.6. Sólidos totales secados a 103 – 105 °C – APHA: 2540 B.....	44
3.6.7. Sólidos totales disueltos secados a 180°C – APHA:2540 C .....	45
3.6.8. Sólidos totales en suspensión secados a 103 – 105°C – APHA: 2540 D .....	45
3.6.9. Enumeración de microorganismos aerobios viables .....	46
3.6.10. Enumeración de microorganismos coliformes totales (Método número más probable). .....	47
3.6.11. Enumeración de coliformes termotolerantes – <i>Escherichia coli</i> termotolerantes (Método número más probable). .....	48



3.6.12. Determinación de <i>Salmonella</i> .....	49
3.6.13. Determinación de <i>Staphylococcus aureus</i> .....	49
3.6.14. Determinación de <i>Vibrio cholerae</i> .....	50
3.6.15. Numeración de fungi (mohos y levaduras).....	50
3.7. Evaluación de diferentes dosis de Fe (III):H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	52
3.7.1. Diseño experimental .....	52
3.7.2. Análisis estadístico.....	53
3.8. Variables .....	53
3.8.1. Variables independientes.....	53
3.8.2. Variables dependientes.....	53
3.8.3. Variables interviniente.....	54
3.9. Flujograma del proceso.....	54
IV. RESULTADOS .....	56
4.1. Caracterización físico-química y microbiológica del lixiviado .....	56
4.2. Evaluación de diferentes relaciones molares en la degradación de lixiviado.....	57
4.2.1. Irradiancia acumulada.....	59
4.2.2. Relación de la irradiancia acumulada con los parámetros físico- químicos evaluados .....	61
4.2.3. Degradación del lixiviado con las diferentes relaciones molares de Fe: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	70

4.3.	Eficiencia de remoción de materia orgánica en lixiviado .....	74
4.4.	Caracterización bacteriana y fúngica en las muestras de mayor remoción de materia orgánica .....	77
V.	DISCUSIÓN.....	80
VI.	CONCLUSIONES.....	84
VII.	RECOMENDACIONES.....	85
VIII.	ABSTRAC.....	86
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87
X.	ANEXOS.....	92

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Relación a la caracterización del lixiviado, evaluado según la edad aproximada.....	15
2. Caracterización fisicoquímica en lixiviado de diferentes rellenos sanitarios de México.....	16
3. Principales procesos de oxidación avanzada.....	19
4. Potencial de oxidación de compuestos químicos.....	27
5. Diseño de 2 factores con tres niveles.....	52
6. Cuadro de análisis de varianza para un experimento bifactorial.....	53
7. Parámetros físicos químicos iniciales del lixiviado.....	56
8. Parámetros microbiológicos iniciales del lixiviado.....	57
9. Volumen de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> a utilizar en los experimentos.....	58
10. Cantidad de Fe(III) a utilizarse en cada experimento.....	58
11. Promedio de irradiancia acumulada de los tratamientos.....	59
12. Análisis de varianza para valores de irradiancia acumulada.....	60
13. Prueba Tukey para Irradiancia acumulada por tiempo de retención.....	60
14. Análisis de varianza para valores de pH.....	62
15. Prueba Tukey para pH por relación molar.....	62
16. Análisis de varianza para valores de potencial eléctrico.....	
17. Prueba Tukey para potencial eléctrico por relación molar.....	64

18	Análisis de varianza para los valores de temperatura de entrada.....	66
19.	Análisis de varianza para los valores de temperatura de salida.....	66
20	Prueba Tukey para temperatura de salida por relación molar.....	67
21.	Datos de sólidos totales, disueltos y suspendidos en el proceso Foto- Fenton.....	69
22.	Resultados de materia orgánica para tiempo de 10 minutos.....	70
23.	Resultados de materia orgánica para el tiempo de 20 minutos.....	71
24.	Resultados de materia orgánica para el tiempo de 30 minutos.....	72
25.	Reducción de la materia orgánica en lixiviado.....	74
26.	Eficiencia de remoción de materia orgánica en el proceso Foto- Fenton.....	75
27.	Análisis de varianza para los valores de la remoción de materia orgánica.....	76
28.	Caracterización bacteriana y fúngica de la relación molar 1:15 de 20 minutos.....	77
29.	Caracterización bacteriana y fúngica de la relación molar 1:25 de 20 minutos.....	78
30.	Caracterización bacteriana y fúngica de la relación molar 1:35 de 20 minutos.....	79
31	Cálculo de las Relaciones molares Fe: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	92
32	Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:15.....	92
33	Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10	93

	minutos - 1:15.....	
34	Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:15.....	94
35	Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:15.....	94
36	Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:15.....	95
37	Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:15.....	96
38	Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:15.....	97
39	Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:15.....	99
40	Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:15.....	100
41	Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:25.....	101
42	Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:25.....	102
43	Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:25.....	
44	Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:25.....	103

45	Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:25.....	104
46	Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:25.....	105
47	Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:25.....	106
48	Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:25.....	108
49	Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:25.....	109
50	Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:35.....	110
51	Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:35.....	111
52	Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:35.....	112
53	Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:35.....	112
54	Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:35.....	113
55	Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:35.....	114
56	Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:35.....	115

	minutos - 1:35.....	
57	Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:35.....	117
58	Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:35.....	118



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Informe 2014-2015, Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional, OEFA - 2015.....	5
2. Botadero municipal del distrito de San Ramón.....	9
3. Estudio de caracterización de residuos del distrito de San Ramón, 2016.....	10
4. Tanque de lixiviado del botadero municipal, 2017.....	12
5. Procesos de oxidación avanzada más habituales e idoneidad de los mismos para el tratamiento de aguas en función de la demanda química de oxígeno (DQO).....	18
6. Espectro de la irradiancia solar comparado con los espectros de absorción de una solución de $\text{Fe}_2 (\text{SO}_4)_3$ (0,25 mM Fe) y una suspensión de $\text{TiO}_2$ (50 mg/l). OD: densidad óptica de muestras de 1 cm de espesor.....	23
7. Esquema del ciclo catalítico de la reacción de foto-Fenton.....	25
8. Espectro terrestre (ASTM, 1987a y 1987b) y extraterrestre (Thekaekara, 1973) de la irradiación solar directa. La absorción de la radiación por parte de diversas sustancias de la atmósfera reduce la radiación sobre la superficie terrestre en determinada.....	31

9. Espectro UV en la superficie terrestre.....	32
10. Experiencia realizada por National Renewable Energy Laboratory en California en 1991 para el tratamiento de agua contaminada por tricloroetileno.....	33
11. Reflectancia espectral de diferentes metales electro-depositados al vacío.....	37
12. Toma de muestras para la caracterización.....	41
13. Flujograma del proceso para el tratamiento de oxidación avanzada.....	55
14. Comportamiento del pH en el proceso foto-Fenton.....	61
15. Comportamiento del potencial eléctrico en el proceso Foto-Fenton.....	63
16. Relación del potencial eléctrico y el pH en el proceso Foto-Fenton.....	64
17. Comportamiento de la temperatura en el proceso Foto-Fenton.....	65
18. Medidas de humedad relativa en el proceso Foto-Fenton.....	67
19. Relación de la humedad relativa y la temperatura ambiental.....	68
20. Comportamiento de los sólidos en el proceso Foto-Fenton.....	70
21. Reducción de la materia orgánica con el tratamiento Foto-Fenton.....	73
22. Eficiencia de remoción de materia orgánica en Foto-Fenton.....	75
23 Estructura del colector parabólico solar.....	120
24 Colector parabólico solar en funcionamiento.....	120
25 Caracterización de parámetros iniciales para el proceso Foto-Fenton.....	121
26 Determinación del índice de oxidabilidad al permanganato.....	121
27 Agregado de perlas de vidrio para la determinación del índice de	122

	oxidabilidad al permanganato.....	
28	Determinación de coliformes totales y coliformes termotolerantes.....	122
29	Prueba no confirmativa para Coliformes totales termotolerantes.....	123
30	Prueba no confirmativa para Coliformes totales.....	123
31	Determinación de <i>Salmonella</i> .....	124
32	Determinación de <i>Vibrión cholera</i> .....	124
33	Determinación de sólidos totales suspendidos y disueltos.....	125
34	Tratamiento Foto-Fenton con 10 minutos de TRH.....	125
35	Tratamiento Foto-Fenton con 20 minutos de TRH.....	126
36	Tratamiento Foto-Fenton con 20 minutos de TRH.....	126

## RESUMEN

La presente investigación se realizó con la finalidad de reducir la carga orgánica presente en el lixiviado estabilizado del botadero municipal de San Ramón mediante oxidación avanzada Foto-Fenton. Este estudio se realizó con un colector parabólico solar basado en la ecuación  $X^2=20y$  de  $0.41 \text{ m}^2$  de área de colector solar y un tubo de borosilicato de 16 mm de diámetro.

El proceso Foto-Fenton se conformó de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) como oxidante, tricloruro férrico hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) como catalizador y radiación solar como fuente fotónica. Se estableció un  $\text{pH}=3$  como  $\text{pH}$  inicial del proceso, empleando un diseño de dos factores con tres niveles (factorial  $3 \times 3$ ). En el factor relación molar se evaluaron dosis de 1:15, 1:25 y 1:35 de  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$  y en el factor tiempo de exposición se evaluaron los periodos de 10, 20 y 30 minutos.

Como resultado se obtuvo una tasa de remoción de materia orgánica de 90.71%, 94.38% y 92.67% para la relación molar de 1:25 de  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$ . De igual manera, un índice de remoción de 85.60%, 89.21% y 88.04% para la relación molar de 1:15 de  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$ . Por otro lado, para la relación molar de 1:35 de  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$ , se encontró una eficiencia de remoción de 86.02%, 87.92% y 87.15%. Se observó que la relación molar 1:25 de  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$  con exposición solar de 20 minutos tiene la mayor eficiencia de remoción de materia orgánica, reduciendo además microorganismos bacterianos y fúngicos, del cual se obtuvo una reducción del 37% de bacterias y 50% en numeración de fungi.

**Palabras claves:** Lixiviado, Oxidación avanzada, Foto-Fenton, Fotocatálisis, Botadero municipal, Relleno Sanitario, Captador Parabólico Solar.

## I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población conlleva a un evidente aumento en la producción de residuos. Prácticamente no hay actividad humana alguna que no genere residuos; existe además una relación directa entre el nivel de vida de una sociedad y la cantidad de residuos generados (CÁCERES, 2002).

La legislación peruana mediante la Ley General de Residuos Sólidos (Ley N° 27314) y su reglamento aprobado mediante DS N° 057-2004-PCM establece que la disposición final de residuos sólidos se realizará en rellenos sanitarios, los cuales son estructuras debidamente equipadas y operadas, que permiten disponer los residuos de manera sanitaria y ambientalmente segura. En el Perú existen apenas trece rellenos sanitarios autorizados y en funcionamiento para una población que supera los treinta tres millones de habitantes (OEFA, 2015); esto demuestra la incapacidad de abastecimiento e indica que gran parte de los residuos generados en el país terminan en lugares de disposición final inadecuados; conocidos también como botaderos.

Los lugares de disposición final ya sean rellenos sanitarios o botaderos, producen un líquido llamado "lixiviado". La generación de lixiviado es inherente a la existencia de vertederos formándose a partir de la percolación del agua a través de los residuos compactados y enterrados en módulos o

celdas de un relleno sanitario o botadero (ANCHIRAICO y VILCAHUAMAN, 2010); influyen también factores como la precipitación anual, infiltración, evaporación, transpiración, heladas, cambios de temperatura, contenido de humedad, composición, y densidad de los residuos (CERDA, 2007). Estos líquidos son difíciles de tratar y más aún cuando se trata de lixiviados viejos o parcialmente estabilizados, pues poseen compuestos recalcitrantes cuya degradación es altamente compleja (Monje et al. 2004, citado por DÁVILA y GRANDA, 2013).

Una de las alternativas más atractivas y viables en la actualidad para tratamiento de lixiviado está enfocada al uso de procesos de oxidación avanzada; capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. Los procesos de oxidación avanzada involucran el uso de oxidantes químicos, usualmente peróxido de hidrógeno, oxígeno u ozono con catalizadores tales como: sales de hierro u óxidos, como el dióxido de titanio y puede requerir irradiación con luz ultravioleta o luz visible (Doménech *et al.*, 2001; citado por CERDA, 2007). Las sales de hierro y el peróxido de hidrógeno por su parte tienen la ventaja de ser productos químicos fáciles de manipular y costo bajo, debido a la cantidad reducida en la aplicación.

En el informe índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional del 2014 - 2015, el OEFA no fiscaliza la producción de lixiviado en los rellenos sanitarios ni en los botaderos, por consiguiente no se tiene la información de la generación de lixiviado en el Perú.

En la actualidad la municipalidad distrital de San Ramón no cuenta con relleno sanitario, en su lugar existe el botadero San Juan de Tulumayo Alto, el cual tiene tres pozos de captación lixiviado con recirculación como medida de control.

Por tanto, dada la peligrosidad de los lixiviados, su capacidad de migración y de contaminación hacia el subsuelo y fuentes de agua de los alrededores, hace que el manejo y tratamiento de estos residuos sea de gran importancia siguiendo normas de sostenibilidad técnica y económica; por consiguiente se formula el siguiente problema:

¿Cuál será la eficiencia de remoción de la carga orgánica en el lixiviado maduro del botadero municipal de San Ramón mediante oxidación avanzada Foto - Fenton?

A la siguiente problemática se planteó la siguiente hipótesis: La aplicación del proceso de oxidación avanzada Foto - Fenton tendrá una eficiencia de remoción del 80% de la materia orgánica presente en el lixiviado del botadero municipal de San Ramón.



## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

- Determinar la reducción de la carga orgánica en lixiviado maduro del botadero municipal de San Ramón mediante oxidación avanzada Foto – Fenton.

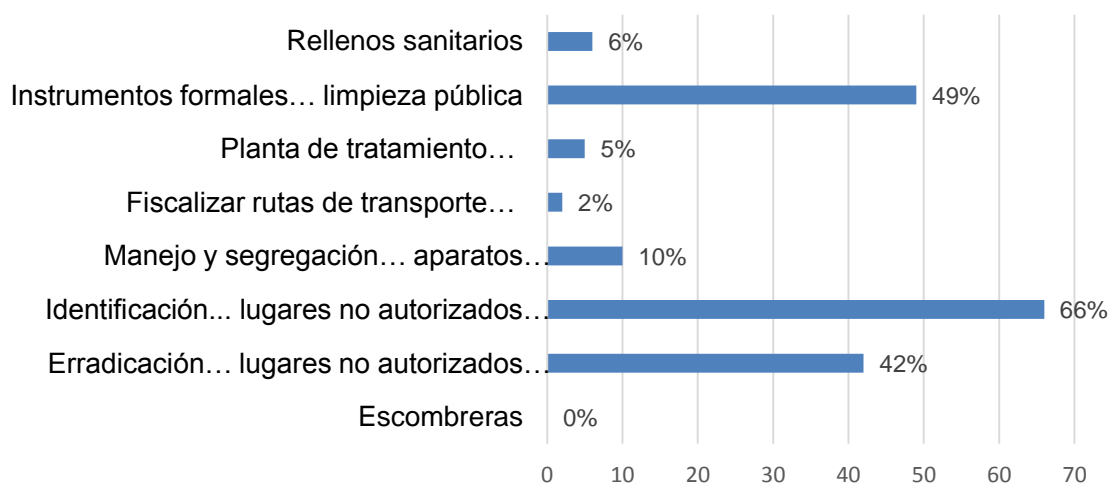
### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar los parámetros físico-químicos y microbiológicos del lixiviado maduro del botadero municipal de San Ramón.
- Evaluar diferentes relaciones molares de Fe (III):H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en la degradación de lixiviado
- Determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica mediante el índice de oxidabilidad al permanganato, con la aplicación del proceso Foto-Fenton.
- Determinar la reducción bacteriana y fúngica de las muestras de mayor remoción de materia orgánica.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Disposición final de residuos sólidos en el Perú

El manejo de los residuos sólidos es un ciclo que evalúa y administra la generación, segregación en fuente, almacenamiento, recolección y transporte, transferencia, tratamiento y la disposición final. La disposición final de residuos es la última etapa del manejo de residuos de gestión municipal, la cual se realiza mediante el método de relleno sanitario, descrito en el Artículo 82°.- del Decreto Supremo N° 57-2004-PCM; así como los residuos de ámbito no municipal se realiza mediante el método de relleno de seguridad.



Fuente. OEFA, 2015.

Figura 1. Informe 2014-2015, Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional, OEFA - 2015.

Según los datos consolidados en el informe 2014 – 2015 “Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional”, mostrada en la figura 1, solo el 6% de las municipalidades provinciales cuentan con un relleno sanitario, este valor equivale en promedio a 13 rellenos sanitarios en todo el territorio peruano para una población que supera los treinta y tres millones de habitantes (OEFA, 2015).

Estos resultados indican que de las 195 municipalidades provinciales que existen en el Perú, 183 realizan la disposición final de los residuos sólidos en lugares inadecuados denominados “botaderos”. Aunque algunos botaderos poseen algunas características técnicas que mitigan ciertos riesgos al ambiente, no son considerados adecuados por no contar con procedimientos y requisitos legales. El Estudio de Impacto Ambiental para infraestructura de disposición final deberá comprender el análisis técnico de aspectos como: Selección de área, topografía, hidrogeología, de suelos, geofísica, geología, meteorología, vulnerabilidad de desastres naturales y otros aspectos de acuerdo a la naturaleza del proyecto (OEFA, 2015).

### **2.1.1. Rellenos Sanitarios**

Los rellenos sanitarios constituyen el método más común para el confinamiento de los residuos sólidos municipales debido a su bajo costo de operación y mantenimiento (Diamadopoulos, 1994; citado por CERDA, 2007).

Según la Ley N° 27314 Ley General de Residuos Sólidos precisa que el relleno sanitario es una estructura de disposición final, debidamente

equipada y operada, que permite disponer los residuos sólidos de manera sanitaria y ambientalmente segura.

### **2.1.2. Clasificación de rellenos sanitarios**

Según la Ley N° 27314, la clasificación de los rellenos sanitarios de acuerdo a su tipo de operación se clasifican en:

- a) Relleno sanitario manual; cuya capacidad de operación diaria no excede a 20 toneladas;
- b) Relleno sanitario semi-mecanizado; cuya capacidad de operación diaria no exceda a 50 toneladas;
- c) Relleno sanitario mecanizado; cuya capacidad de operación diaria es mayor a 50 toneladas.

Uno de los principales problemas que se presentan en el proceso de disposición final es la generación de lixiviado. En el diseño y construcción de un relleno sanitario es importante tomar en cuenta la producción de lixiviado, por lo que se debe localizar lejos de las corrientes superficiales evitando que se contaminen los acuíferos (CERDA, 2007).

### **2.1.3. Instalaciones mínimas de un relleno sanitario**

Según la Ley N° 27314, 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;
8. Señalización y letreros de información.
9. Sistema de pesaje y registro.
10. Construcciones complementarias como: caseta de control, oficina administrativa, almacén, servicios higiénicos y vestuario; y,
11. Otras instalaciones mencionadas en el Reglamento y normas vigentes

#### **2.1.4. Botaderos a cielo abierto**

Los botaderos son lugares de disposición ilegal de residuos sólidos, suele funcionar sin criterios técnico, sin ningún tipo de control sanitario, impactando negativamente el agua, aire y suelo, por la formación de gases, lixiviados, quemados, humos, polvos y olores nauseabundos. Los botaderos a cielo abierto generan focos infecciosos para la salud de las personas y el ambiente (CEPIS, 2002), (OEFA, 2014).

En nuestro país existen 20 botaderos en estado crítico, de ellos, el botadero “El milagro” ubicado en la ciudad de Trujillo, es el más complicado,

otras ciudades con la misma problemática son Tumbes, Paíta y Sullana (Piura), Yacucatina y Tarapoto (San Martín), Coishco (Áncash), Pucallpa (Ucayali), Huaura y Cañete (Lima), Rumiallana (Pasco), El Edén (Junín), Quitasol (Apurímac), Chilla (Puno), Quebrada Cementerio (Moquegua); y La Moyuna (Huánuco) (OEFA, 2014).

### **2.1.5. Botadero municipal San Juan de Tulumayo Alto, San Ramón, Chanchamayo**

El botadero municipal San Juan de Tulumayo Alto (figura 2) está ubicado aproximadamente a 8 km de distancia de la Municipalidad distrital de San Ramón. Se estima que al menos se han enterrado más de 30 000 toneladas de residuos sólidos; el área total impactada es de 8000 m<sup>2</sup> con un área total de 3 hectáreas (INFORME N°036-2014-OEFA-ODJUNIN/RRSS, 2014).



Figura 2. Botadero municipal del distrito de San Ramón.

Actualmente en el botadero municipal cuenta con 14 trabajadores que se encargan de segregar los residuos aún recuperables, los cuales son separados y acumulados en costales dispuestos a un área específica.

Se ha determinado según el estudio de caracterización de residuos una generación per cápita de 0.57 Kg/hab-día y una generación de residuos sólidos municipales de 0.8 Kg/hab-día; con un total de 23.3 t/día.

Se muestra la composición de los residuos compactados en el distrito de san Ramón, según el estudio específico de caracterización de residuos sólidos domiciliarios realizados por la municipalidad distrital de San Ramón del año 2016 (Figura 3).

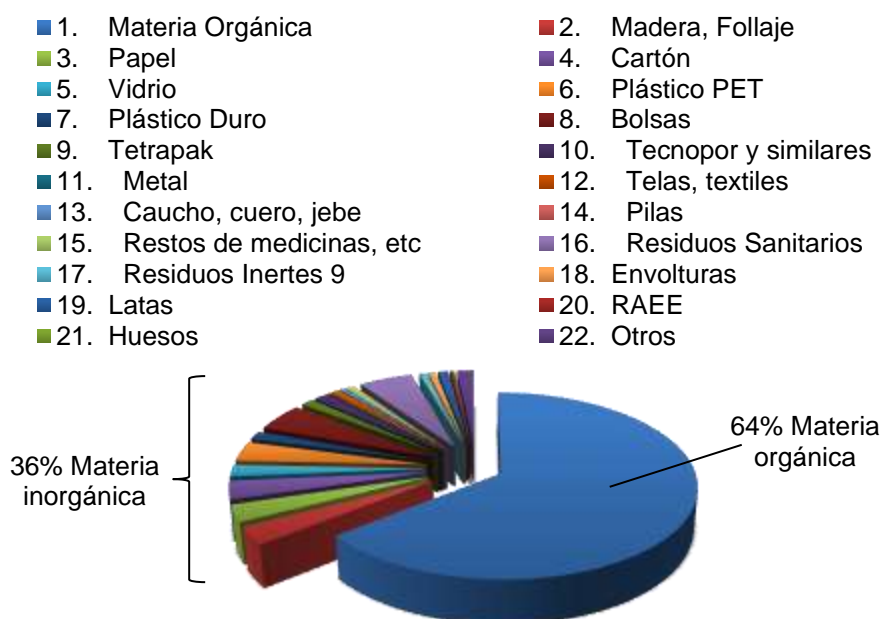


Figura 3. Estudio de caracterización de residuos del distrito de San Ramón, 2016.



De la caracterización se obtuvo la presencia de un 64% de materia orgánica, 3.11% de madera y follaje, 2.92 de papel, 3.21% de cartón, 2.08% de vidrio, 3.48%, de plástico PET, 1.48% de plástico duro, 4.87% de bolsas, 1,23% de tetrapack, 1.42% de tecnopor y similares, 0.13% de metales, 0.89% de telas y textiles, 0.38% de caucho, cuero y jebe, 0.01% de pilas, 0.85% de restos de medicinas, 5.19% de residuos sanitarios, 0.72% de residuos inertes, 0.70% de envolturas, 1.02% de latas, 0.27% de RAEE, 0.13% de huesos y 1.61% de otros residuos. Como se puede observar en la figura 3, de todos los residuos sólidos el porcentaje más alto lo constituye la materia orgánica con 64%, el cual posee descomposición más acelerada que la materia inorgánica. En la actualidad la materia orgánica que llega al botadero municipal es parcialmente segregada y dispuesta en el área de compostaje previsto.

Por otro lado las estructuras que destacan dentro del botadero municipal son: el comedor, los servicios higiénicos, la planta de segregación, las trincheras y los tanques de lixiviado.

Actualmente el botadero municipal tiene tres tanques de lixiviado. Los dos primeros tanques captan el lixiviado generado de trincheras antiguas ya clausuradas y el tercer tanque capta el lixiviado tanto de trincheras antiguas como de la trinchera que se encuentra en operación.

El tanque que recibe lixiviado de la trinchera en operación se muestra en la figura 4, es de 250 m<sup>3</sup>, el cual se llena aproximadamente en una semana. El caudal que se genera hacia el tanque de lixiviado varía según la época del año, teniendo un promedio anual aproximado de 0.5 l/s.



Figura 4. Tanque de lixiviado del botadero municipal, 2017.

## **2.2. Generación de lixiviado**

### **2.2.1. Definición de lixiviado**

Según la Ley de Residuos Sólidos Ley N° 27314, se define a los lixiviados como: líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión elementos o sustancias que se encuentren en los mismos residuos. Esta definición se asemeja a la Norma NOM-083-SEMARNAT-2003 - Norma Mexicana, con la diferencia que describe riesgos potenciales que este puede generar al contacto con el ser humano o el medio ambiente; el cual describe a un lixiviado como el líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos u que contienen en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse

fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que pueden dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocan su deterioro y representan un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos (DOF, 2003, citado por CERDA, 2007). Se debe considerar que los lixiviados están influenciados con factores como:

- Precipitación pluvial en el área de relleno
- Escorrentía superficial y/o infiltración subterránea
- Evapotranspiración
- Humedad natural de los residuos sólidos municipales
- Grado de compactación
- Capacidad de campo (capacidad del suelo y de los residuos sólidos municipales para retener humedad).

Se estima que por cada tonelada de residuos sólidos urbanos se genera 0.2 m<sup>3</sup> de lixiviado, y tras su clausura, un relleno sanitario puede seguir generando lixiviado durante más de 50 años (Kurniawan *et al.*, 2010, citado por VILAR 2015).

### **2.2.2. Composición y características del lixiviado**

El lixiviado es un residuo de difícil tratamiento por su característica y composición compleja que posee. La empresa alemana WEHRLE-WERK AG, la empresa alemana fundada en 1860, con actividad a nivel mundial y pionera en la aplicación de biorreactores con membrana en lixiviado (primera planta MBR de lixiviados construida en Alemania 1991); expone en la XIV Conferencia

ATEGRUS Vertederos Controlados, que todos los lixiviados del mundo tienen una composición típica de los siguientes cuatro componentes:

- **Materia orgánica biodegradable (DQO, DBO<sub>5</sub>)**

La biodegradabilidad en el caso de lixiviados de vertedero es mayor de la esperada a partir de la relación DBO/DQO medida (entre 30 y 40%). En el caso de lixiviados de centros de tratamiento (compostaje, digestión anaerobio) son aguas de mayor biodegradabilidad.

La composición química de los lixiviados varía mucho según la antigüedad del relleno y la historia previa al momento del muestreo. La biodegradabilidad se puede supervisar mediante las relaciones de DBO/DQO. Las relaciones de 0.4 a 0.6 se toman como indicador de materia orgánica fácilmente biodegradables (Tchobanoglous *et al.* 1994, citado por CERDA, 2007).

- **Compuestos nitrogenados**

Se encuentran en alta concentración, como NTK Y N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, procedentes de la degradación de las proteínas y aminoácidos presentes en los residuos sólidos urbanos. Se requiere su eliminación previa a su vertido.

- **Sales (Cloruros, carbonatos, sulfuros, entre otros)**

Aportan capacidad tampón al lixiviado, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de diseñar procesos de tratamiento con variación de pH. Su eliminación puede ser necesaria en función de la legislación de cada país.

- **Metales pesados**

Su presencia depende de la naturaleza del residuo sólido urbano.

La edad de éste influye en su concentración.

Cuadro 1. Relación a la caracterización del lixiviado, evaluado según la edad aproximada.

Parámetros	Joven	Intermedio	Viejo
Años	<5	5 – 10	>10
pH	<6.5	6.5 – 7.5	>7.5
DQO(mg/L)	>10 000	4 000 – 10 000	<4 000
DBO <sub>5</sub> /DQO	0.5 – 1.0	0.1 – 0.5	<0.1
COT/DQO	<0.3	0.3 – 0.5	>0.5
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	<400	-	>400
Metales pesados			

Fuente. BONEY y KATOCH, 2016.

Según CERDA (2007), en su investigación presenta también una caracterización de los parámetros fisicoquímicos en lixiviados maduros de diferentes rellenos sanitarios de México.

Un lixiviado estabilizado puede permanecer estable por décadas manteniendo concentraciones de materia orgánica recalcitrante del orden de

miles de mg/l, lo que dificulta y condiciona su destino final en el ambiente (Monje-Ramírez, 2004; citado por CERDA, 2007).

Cuadro 2. Caracterización fisicoquímica en lixiviado de diferentes rellenos sanitarios de México.

Parámetro	Morelia Michoacán	Prados de La Montaña	Santa Catarina	Bordo Poniente	Mérida Yucatán	Xalapa Veracruz
Ph	8.16	8	8.05	8	8.04	8
DQO(mg/l)	4295	37000	16692	2930	5764	10632
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	220	13800	6295	280	1652	915
COT(mg/l)	1488	-	-	-	2857	-
ST(mg/l)	7519	-	-	-	12810	14960
STV(mg/l)	2863	-	-	-	3839	-
Color (PtCo)	18222	-	-	3530	-	-
Conductiv. (mS/cm)	10.42	-	-	20.3	-	-
SDT(mg/l)	51.40	7454	17400	11500	12737	13700
DBO <sub>5</sub> :DQO	0.05	0.37	0.38	0.1	0.29	0.09
COT:DQO	0.35	-	-	-	0.50	-

Fuente. Durán *et al.*, 2002; Galicia, 2006; González y Valdivia, 2000; Méndez *et al.*, 2002; Morales, 2000, citado por CERDA, 2007.

### 2.2.3. Microorganismos en los lixiviados

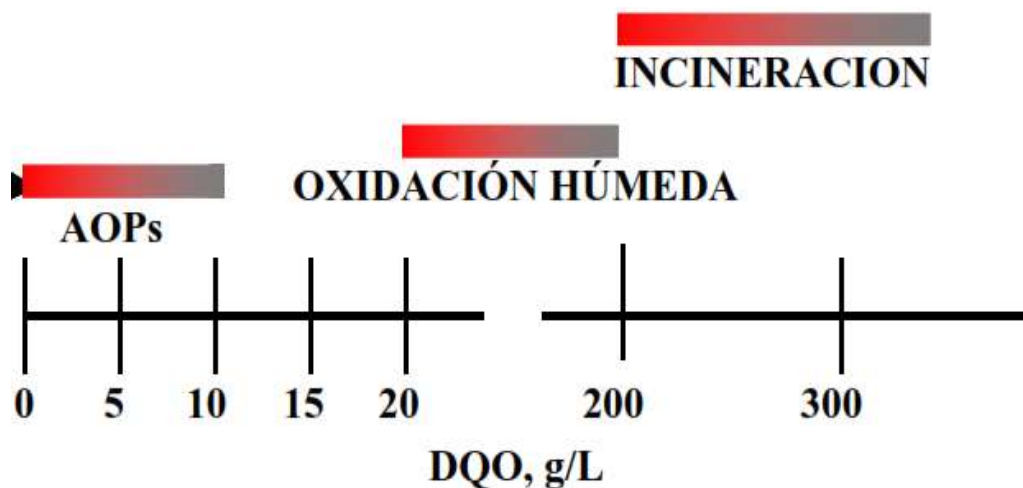
Las bacterias que más frecuentemente pueden ser aisladas en los lixiviados son aquellas de los géneros *Bacillus*, *Corynebacterium* y *Streptococcus*. También se han identificado cepas encontradas regularmente en aguas residuales (*Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, etc.), además de hongos y levaduras. Se ha observado en los lixiviados la presencia de enterovirus y de gérmenes fecales (Coliformes y *Streptococcus*); sin embargo, estas bacterias probablemente no logren pasar a través del suelo. Los riesgos de contaminación microbiana de mantos freáticos son bajos, de la misma forma que la supervivencia de gérmenes patógenos es relativamente débil en las superficiales no estancadas (Robles, 2005; citado por CERDA, 2007).

### 2.3. Proceso de oxidación avanzada

El proceso de oxidación avanzada (POA) se basa en la generación de especies fuertemente oxidantes (CÁCERES, 2002) como los radicales hidroxilo (OH $\cdot$ ) que actúan como iniciadores de oxidación (GARCÉS y RODRÍGUEZ, 2009). La generación de OH tiene mayor éxito entre los POAs, por ser un oxidante químico con carácter no selectivo, capaz de reaccionar rápidamente con una inmensa mayoría de compuestos orgánicos (CERDA, 2007), (PRIMO, 2008), principalmente por absorción de hidrógeno o por adición electrolítica a dobles enlaces generándose radicales orgánicos libres (R $\cdot$ ). Estos reaccionan a su vez con moléculas de oxígeno formando un peróxido radical, iniciándose una serie de reacciones de degradación oxidativa que pueden

conducir a la completa mineralización del contaminante (Malato y Cáceres, 2001, citado por CERDA, 2007), (CÁCERES, 2002).

Un aspecto importante a tener en cuenta para la aplicabilidad del proceso de oxidación avanzada, es el contenido de materia orgánica en el agua, debido a razones de cinéticos como la absorción del catalizador, absorción de luz, consumo de oxígeno durante la oxidación.



Fuente. CÁCERES, 2002.

Figura 5. Procesos de oxidación avanzada más habituales e idoneidad de los mismos para el tratamiento de aguas en función de la demanda química de oxígeno (DQO).

El proceso de oxidación avanzada (POA) permite destruir una gran variedad de compuestos tóxicos y peligrosos aún en bajas concentraciones, que son persistentes a la degradación natural. Produciendo los efectos de: 1) oxidación de contaminantes orgánicos, 2) reducción de la toxicidad, 3)



reducción de la DQO, 4) reducción de la DBO<sub>5</sub>, y 5) eliminación de color y olor (SANCHEZ, 2007).

Cuadro 3. Principales procesos de oxidación avanzada.

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino (O <sub>3</sub> /OH)	Oxidación en agua sub/ y supercrítica.
Ozonización con peróxido de hidrógeno (O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	Procesos fotoquímicos
Procesos Fenton (Fe <sup>2+</sup> / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío(UVV)
Oxidación electroquímica	UV/peróxido de hidrógeno
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	UV/O <sub>3</sub>
Plasma no térmico	Foto-Fenton y relacionados
Descarga electrohidráulica- Ultrasonido	Fotocatálisis heterogénea

Fuente. AZNATE, 2013

### 2.3.1. Investigaciones experimentales en procesos de oxidación avanzada

Hasta la fecha se ha realizado una multitud de investigaciones a nivel experimental en países como Estados Unidos, México, Canadá, Japón,

Alemania, España entre otros; obteniendo buenos resultados como se presentan:

En Yucatán, México se usó la oxidación Fenton como tratamiento para lixiviado del relleno sanitario de la ciudad de Mérida, las condiciones óptimas fueron de 20 minutos de tiempo de contacto y un valor de pH igual a 4; mientras que la dosis optima fue de 600 mg/L de  $H_2O_2$  y 1000 mg/L de  $Fe^{2+}$ ; con la cual se logró un porcentaje de remoción promedio de materia orgánica, medida como DQO de 78% y medida como COT de 87% (MÉNDEZ *et al.*, 2010).

En otro estudio también en México se demostró que al juntar los lixiviados estabilizados con los jóvenes, se favorecen la eficiencia de remoción al incrementar la materia orgánica en la mezcla de agua residual – lixiviado a tratar. Posteriormente se realizó una investigación para optimizar las condiciones de tratamiento de lixiviado con el proceso de oxidación avanzada con énfasis en los parámetros colectivos y caracterización de lixiviado, se obtuvo una alta eficiencia con remoción de 76.7% de DQO, color en un 76.4% y remoción del 50% de sustancias húmicas (ORTA *et al.*, 2006).

En Colombia se realizó pruebas con la industria textil mediante el proceso de oxidación avanzada con reactivos Fenton ( $Fe-II/H_2O_2$ ) y  $Fe-III/H_2O_2$ ) en presencia y ausencia de luz ultravioleta, usando el colorante Rojo HE-7B, el cual se encuentra en las aguas residuales de la industria textil. Los mayores porcentajes de remoción fueron a los 20 minutos de irradiación UV con un pH=3 y una relación molar  $H_2O_2/Fe (II)$  de 20:1, alcanzándose una remoción completa de color y el 79% de COT. Otro resultado obtenido usando la

oxidación fotocatalítica con  $\text{TiO}_2$ , fue la degradación del colorante Negro ácido, a una concentración de 0.01g/L en agua a pH 7, degradó el colorante en un 97.5% en 30 minutos y alcanzó el 100% en una hora (GARCÉS y RODRÍGUEZ, 2009).

Otra experiencia en Colombia fue el uso de la fotocatálisis solar homogénea (Foto - Fenton), como un método para degradar fenol de 200 ppm, utilizando el reactivo Fenton (peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso), con pH de 2.8 y 3.2 a temperatura ambiente; obteniéndose un óptimo de degradación de 74.2 % (AZNATE *et al.*, 2013).

En Lima, Perú se hizo una investigación usando el proceso de oxidación química avanzada ozono – peróxido de hidrógeno para dar tratamiento y reducir los compuestos fenólicos, de las aguas residuales de los baños portátiles. Se inyectó ozono desde un equipo ozonizador de 0.223 g/h, con un caudal de aire ozonizado de 15 L/min (constante) y peróxido de hidrógeno en diferentes concentraciones, 0.25, 0.50, 1.00 y 2.00 molar, se logró reducir los compuestos fenólicos hasta valores de 0.01 mg/l en 3 horas (QUICAÑO, 2014).

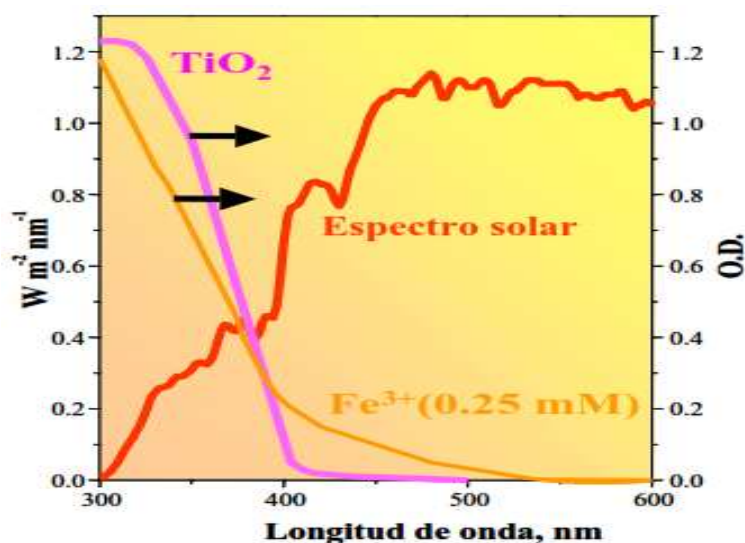
En USA, se comparó la eficiencia de los procesos Fenton y Foto – Fenton homogéneo en presencia de Fe (III), obteniendo como resultado una eficiencia del proceso de foto- Fenton homogénea significativamente más alta que el proceso Fenton homogénea, que es debido a la rápida formación de  $\text{Fe}^{2+}$  bajo irradiación UV del complejo del hierro y la formación fotoquímica de  $(\text{HO}\cdot)$  de la fotólisis del complejo Fe (III) (WU *et al.*, 2014).

En Irán, se hizo una investigación optimizando el proceso de oxidación Fenton para incrementar la biodegradabilidad de lixiviado maduro (5 – 10 años) de relleno sanitario usando la metodología dosis respuesta, las condiciones óptimas fueron:  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+} = 14 - 17$ ,  $\text{pH} = 3 - 3.5$  con un tiempo de contacto de 130 minutos (FARROKHI y JAMALI, 2015).

### **2.3.2. Reacción Foto-Fenton**

El proceso Fenton fue descubierto por Henry J. H. Fenton a finales del siglo XIX, a través de un estudio en el cual demostró que el peróxido de hidrógeno podía ser activado por sales  $\text{Fe}^{+2}$  para oxidar ácido tártrico (Fenton, 1984, citado por SIRTORI, 2010).

El reactivo Fenton se basa en la combinación de un oxidante fuerte con un catalizador, con el propósito de generar radicales hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ) (PRIMO, 2008); el catalizador en términos generales es una sustancia que aumenta la rapidez o la velocidad de una reacción química, sin verse alterada ella misma en el proceso. Los procesos Fenton comúnmente utilizan el peróxido de hidrógeno como oxidante fuerte, la reacción de la descomposición del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno, aunque es favorecida termodinámicamente, es muy lenta, a menos que esté catalizada. Al agregar un ion férrico (tricloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ )) la velocidad de reacción aumenta unas 1 000 veces. Por otro lado la proteína hemoglobina, que contiene hierro, es aún más eficaz para incrementar la velocidad de esta reacción, ya que es aproximadamente 1 000 000 de veces más rápido que el proceso que el proceso sin catalizar (CHRISTOPHER *et al.*, 2013).



Fuente. CÁCERES, 2002

Figura 6. Espectro de la irradiancia solar comparado con los espectros de absorción de una solución de  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  (0,25 mM Fe) y una suspensión de  $\text{TiO}_2$  (50 mg/l). OD: densidad óptica de muestras de 1 cm de espesor.

El proceso Fenton es fuertemente acelerada por la radiación UV/visible permitiendo el uso de longitudes de onda desde 300 nm hasta 580 nm (Rossetti *et al.*, 2001, citado por CERDA, 2007), favoreciéndose así el grado de degradación de contaminantes orgánicos, incluidos compuestos aromáticos y alifáticos; proceso que entonces es llamado Foto-Fenton.

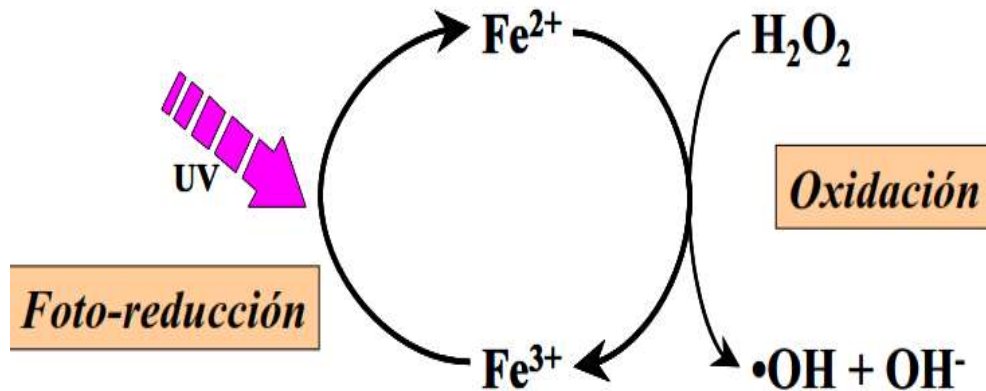
El proceso Foto-Fenton consiste en la generación de radicales hidroxilo a partir de la reacción entre el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , la radiación UV y el ion  $\text{Fe}^{2+}$  ó  $\text{Fe}^{3+}$  (Wang, 2003, citado por VILAR 2015). El hierro puede ser añadido como sal ferrosa o férrica. El proceso se convierte el catalítico ya que el ión  $\text{Fe}^{2+}$  oxidado a  $\text{Fe}^{3+}$  en la reacción Fenton se reduce nuevamente a  $\text{Fe}^{2+}$  por acción de la radiación, ambas reacciones generan radicales hidroxilo (CÁCERES,

2002). Es común encontrar en la bibliografía intentos por distinguir el inicio de la reacción del proceso Foto-Fenton entre  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Fe}^{+3}$  para generar los iones  $\text{OH}\cdot$ ; sin embargo, se observa que ambas especies están presentes simultáneamente en la cadena de reacciones, independientemente de cual sea la especie utilizada (CABRERA, 2013).



En la reacción (1) se van acumulando los iones  $\text{Fe}^{+3}$  a medida que los iones  $\text{Fe}^{+2}$  se consumen hasta que la reacción se detiene. Pero con la reacción Foto-Fenton que incluye la radiación en la reacción (2), existe una regeneración fotoquímica de los iones  $\text{Fe}^{+2}$ , además de generar más radicales hidroxilos que son usados en el proceso (AZNATE *et al.*, 2013), (GARCÉS y RODRÍGUEZ, 2009).

La principal ventaja del proceso Foto-Fenton con respecto a fotocatalisis heterogénea, es su mayor sensibilidad a la luz llegando hasta el visible, lo que supone más aprovechamiento de la energía solar (CÁCERES, 2002). Otra de las ventajas de las sales de hierro es que no es toxico, es fácil de usar y es ambientalmente benigno (Doménech *et al.*, 2001; citado por CERDA, 2007).

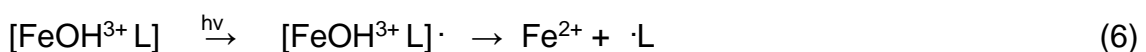


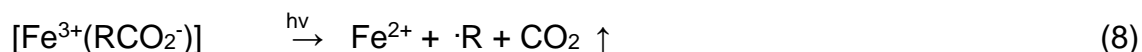
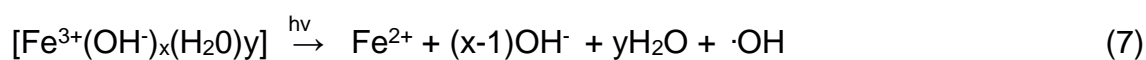
Fuente. CÁCERES, 2002.

Figura 7. Esquema del ciclo catalítico de la reacción de foto-Fenton.

Otra de las ventajas es la profundidad de penetración, ya que el catalizador está en disolución permitiendo el paso de la luz en función de la concentración del hierro. En el caso del proceso Foto-Fenton, los reactores se pueden diseñar con más libertad, ajustándose después la concentración de hierro correcta; con el objetivo de que el contacto entre el contaminante y el agente oxidante sea el mejor posible. Por lo contrario una de las desventajas son el bajo pH requerido y la necesidad de separar el hierro después de concluida la reacción (CÁCERES, 2002).

Se sugiere que los radicales hidroxilos  $\text{OH}\cdot$  se formarían de la siguiente manera:





A pH < 3, la reacción es autocatalítica, ya que el Fe<sup>3+</sup> descompone H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O a través de un mecanismo en cadena (CERDA, 2007).



### 2.3.3. Reactividad del radical hidroxilo

Los radicales hidroxilo son capaces de destruir y detoxificar compuestos orgánicos halogenados, aumentando la biodegradabilidad del agua residual debido a la ruptura de estructuras aromáticas, de enlaces carbono-carbono sencillos (C-C) o dobles (C=C), o de enlaces carbono-halógeno (C-X) (Gao 2015, citado por VILAR, 2015).



El radical hidroxilo es una de las especies químicas más reactivas que se conocen.

Cuadro 4. Potencial de oxidación de compuestos químicos.

Reactivos	Poder de oxidación relativo (Cl <sub>2</sub> =1.0)
Radical hidroxilo	2.05
Oxígeno atómico	1.78
Ozono	1.52
Peróxido de hidrógeno	1.30
Hipoclorito	1.10
Cloro	1.17
Dióxido de cloro	1.00
Dióxido de cloro	0.92
Oxígeno (molecular)	0.90

Fuente. QUICANO, 2014.

Los iones hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), teóricamente, son capaces de oxidar y mineralizar casi cualquier molécula orgánica hasta  $\text{CO}_2$  y compuestos inorgánicos y, además, destacan por sus ataques no selectivos, una característica de elevada importancia en el tratamiento de las aguas residuales, puesto que permite la descontaminación de mezclas de contaminantes (MALATO *et al.*, 2009). En concreto, los radicales hidroxilo reaccionan con compuestos orgánicos, generando radicales orgánicos que aceleran el grado de oxidación (GARCÉS y RODRÍGUEZ, 2009).

## 2.3.4. Factores que influyen en el proceso foto-Fenton

### 2.3.4.1. Influencia de pH

La velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un pH=3, los pH óptimos reportados son 2,8 y 3. Se ha demostrado que la velocidad de reacción disminuye cuando el pH es >4 debido a la precipitación de hierro en forma de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y a pH <2, se produce la formación de  $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$ , el cual reacciona lentamente con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  obstaculizando la generación de  $\text{OH}\cdot$ . (CÁCERES, 2002), (CERDA, 2007), (PRIMO, 2008); (GARCÉS y RODRÍGUEZ, 2009), (García 2007, citado por AZNATE *et al.*, 2013).

### 2.3.4.2. Relación $\text{H}_2\text{O}_2/\text{FeCl}_3$

Las investigaciones realizadas en la Plataforma Solar de Almería concluyó que la concentración óptima se encuentra entre 0.2 – 0.5 mM de  $\text{Fe}^{3+}$ , valor obtenido de la relación molar con  $\text{H}_2\text{O}_2$  a usar (DOS SANTOS, 2009). Sin embargo Cáceres describe en su tesis doctoral que normalmente en la reacción Foto-Fenton se usa una concentración de 0.05mM de  $\text{Fe}^{2+}$  en forma de sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) (CÁCERES, 2002). Para otros autores la adición de una concentración demasiado baja del agente oxidante conlleva velocidades de degradación lentas y, una adición demasiado elevada, provoca la pérdida de eficiencia en el consumo del mismo, puesto que el peróxido de hidrógeno compite por el radical hidroxilo y se descompone sin oxidar el contaminante (CABRERA, 2013).

Aunque existen numerosos estudios, todavía no se ha encontrado una fórmula universal con la cual se determine la relación ideal en cada proceso, por lo tanto todo proceso es diferente y dependen de su naturaleza, composición del agua a tratar y principalmente del grado de oxidación que se desea alcanzar (García 2007, citado por AZNATE *et al.*, 2013).

#### **2.3.4.3. Tiempo**

Es lógico pensar que aumento de concentración de contaminante implica un aumento del tiempo de tratamiento, según (Kruzler, 1999, citado por CABRERA 2013), esta relación no es directamente proporcional, por tanto si el agua sufre importantes cambios en la concentración de contaminante, el escalado y diseño del proceso necesitará nuevos datos (CABRERA, 2013).

#### **2.3.4.4. Influencia de la temperatura**

El aumento de la temperatura supone, por lo general un incremento en la velocidad de las reacciones de oxidación (García 2007, citado por AZNATE *et al.*, 2013). Sin embargo según algunos autores como (BLANCO *et al.*, 2001), (CÁCERES, 2002), (DOS SANTOS, 2009), (SIRTORI, 2010), la temperatura no desempeña un papel importante en el proceso fotocatalítico, debido a que el proceso Foto-Fenton es fotónico a diferencia de los procesos térmicos.

## 2.4. Reactores solares para fotocatalisis

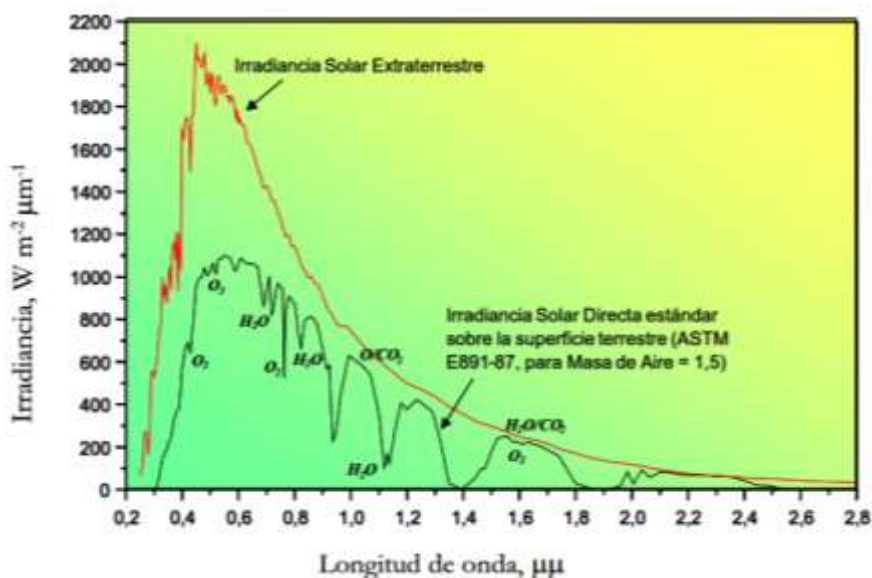
### 2.4.1. Radiación solar

La energía irradiada por el Sol es transportada en forma de ondas electromagnéticas (fotones) en una amplia gama de longitudes de onda diferentes, las cuales se desplazan en el espacio vacío a una velocidad de 300000 km/s, tardando 8 minutos en recorrer los 150 millones de kilómetros que hay entre el sol y la tierra. La mayor parte de fotones emitidos por el Sol tienen una longitud de onda comprendida entre 0.3  $\mu\text{m}$  y 3  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ ), aunque solamente las que van desde 0.4  $\mu\text{m}$  y 0.7  $\mu\text{m}$  son susceptibles a ser captados por el ojo humano, formando lo que se conoce como luz visible. Las longitudes de onda menores a 0.4  $\mu\text{m}$  o mayores a 0.7  $\mu\text{m}$  pertenecen a la luz no visible, las cuales también transportan una considerable cantidad de energía a tener en cuenta (CENSOLAR, 2013).

La radiación solar que alcanza la superficie, sin ser absorbida o desviada, se denomina radiación directa, la que alcanza la superficie de la Tierra pero que ha sido desviada es la radiación difusa y la suma de la radiación directa y difusa es la radiación total (CÁCERES, 2002), (CENSOLAR, 2013).

En la Figura 8 se muestra el espectro estándar de la radiación directa que incide en la superficie terrestre en un día claro (Wilskins *et al.*, 1994; CÁCERES, 2002). Se observa que la radiación ultravioleta solar es, por tanto, una parte pequeña del espectro solar. El porcentaje de radiación UV global, con respecto al global total, suele aumentar al disminuir la

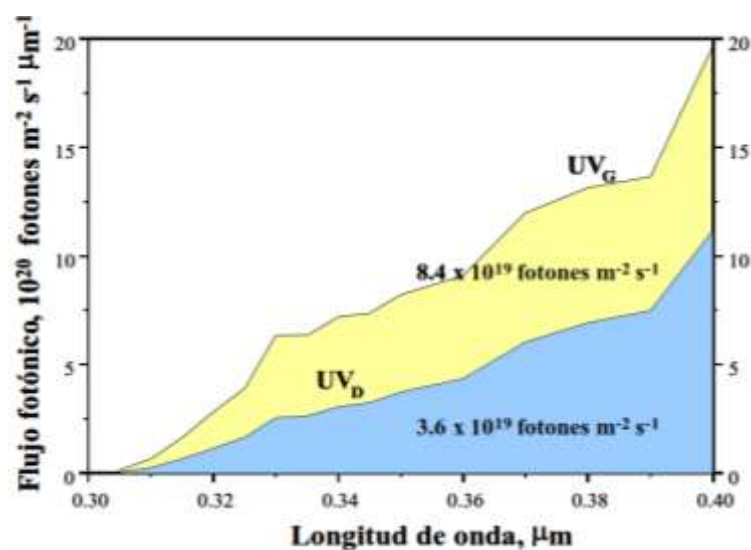
transmisividad de la atmósfera, debido fundamentalmente a nubes, pero también a aerosoles y polvo (Mehos *et al.*, 1992; citado por CÁCERES, 2002).



Fuente. CACERES, 2002.

Figura 8. Espectro terrestre (ASTM, 1987a y 1987b) y extraterrestre (Thekaekara, 1973) de la irradiación solar directa. La absorción de la radiación por parte de diversas sustancias de la atmósfera reduce la radiación sobre la superficie terrestre en determinada

Los espectros representados en la Figura 9 corresponden al espectro representado en la figura 8 para la franja UV del espectro solar (CÁCERES, 2002). El menor de los espectros corresponde a la UV directa y su valor alcanza los  $22 \text{ Wm}^{-2}$  entre 300 nm y 400nm de longitud de onda; el mayor corresponde a la UV global y su valor es de  $46 \text{ Wm}^{-2}$ . Estos valores dan una idea de la energía UV procedente del Sol y la energía disponible para reacciones fotocatalíticas con Foto-Fenton.



Fuente. CÁCERES, 2002.

Figura 9. Espectro UV en la superficie terrestre.

#### 2.4.2. Instalaciones experimentales en fotocatalisis solar

Las primeras plantas piloto fueron desarrolladas a finales de los 80, por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) Y Sandia National Laboratories, ambos en USA. Estos sistemas experimentales inicialmente fueron diseñados para aplicaciones térmicas, los cuales fueron modificados simplemente reemplazando el tubo colector por un tubo de vidrio Pyrex a lo largo del cual fluía el agua contaminada (BLANCO *et al.*, 2001), (Anderson *et al.*, citado por CÁCERES, 2002).

Desde entonces se han propuesto una amplia variedad de diseños en todo el mundo con el objetivo continuo de aumentar la eficiencia y reducir los costes de los sistemas fotocatalíticos para la descontaminación y el tratamiento de aguas.



Fuente. BLANCO *et al.*, 2001.

Figura 10. Experiencia realizada por National Renewable Energy Laboratory en California en 1991 para el tratamiento de agua contaminada por tricloroetileno.

### **2.4.3. Tipo de reactores solares**

#### **2.4.3.1. Reactores cilindro-parabólicos**

Los colectores cilindro-parabólico tienen una superficie reflectante de forma parabólica que concentra la radiación sobre un receptor tubular situado en el foco de la parábola, pueden ser de seguimiento en un eje, bien acimutal (movimiento este-oeste alrededor de un eje situado norte-sur) o de altura (movimiento norte-sur alrededor de un eje orientado este-oeste), o de seguimiento de dos ejes (acimutal + altura) (CÁCERES, 2002).

### 2.4.3.2. Reactores solares sin concentración

Estos reactores se caracterizan por ser más estáticos y no poseer ningún tipo de seguimiento solar; usualmente consisten en una placa plana, en muchos casos situados hacia el Sol mediante una inclinación determinada (CÁCERES, 2002).

- a) **Placa plana o cascada:** En este tipo de reactores se fija el catalizador en la superficie de la placa inclinada por la que al agua a contaminada fluye. No se pueden utilizar componentes volátiles por encontrarse abiertos a la atmósfera.
- b) **Placa plana hueca:** Consiste en dos placas planas inclinadas hacia el sol entre las cuales circula el agua contaminada a tratar.
- c) **Tubulares:** El funcionamiento de este reactor es básicamente el mismo, consisten en una gran cantidad de tubos pequeños conectados en paralelo, funcionando con flujos más lentos que la placa plana.
- d) **Balsa superficial:** Esos colectores son especialmente usados para tratamiento de agua de desecho. Consiste en un depósito tipo balsa con poca profundidad para permitir la penetración de la luz en toda el área de la superficie.

### 2.4.3.3. Reactores cilindro-parabólico compuesto (CPCS)

Los reactores cilindro parabólico compuesto es una mezcla entre los cilindro parabólicos y los sistemas sin concentración, una de las ventajas más destacadas es el uso de la radiación directa y difusa (CÁCERES, 2002),



(CERDA, 2007). Gracias al diseño reflectantes de la superficie, toda la radiación es recogida y usada en el proceso fotocatalítico.

#### **2.4.4. Parámetros limitantes de diseño**

##### **2.4.4.1. Disposición del catalizador**

En la actualidad los trabajos experimentales por lo general usan catalizadores en suspensión, que pueden ser usados en procesos fotocátalisis homogéneas o heterogéneas. La disposición del catalizador dentro del reactor es un aspecto todavía a desarrollar, ya que se requiere trabajar con suspensiones o algún tipo de soporte inerte. Estos soportes pueden ser en forma de malla, reticulares, etc.

Las ventajas de trabajar con el catalizador inmovilizado en vez de en suspensión son claras: se evita la separación posterior al tratamiento, su recuperación en unas condiciones óptimas que permitan su reutilización y la resuspensión del sólido como paso previo del proceso. Existe una multitud de propuestas, pero aún no hay una decisión sobre cuál sería la más idónea. (Pozzo *et al.*, 1997, citado por BLANCO *et al.*, 2001).

##### **2.4.4.2. Iluminación y concentración de catalizador**

En estrecha relación con la concentración de catalizador se encuentra otro parámetro importante de diseño, como es el caso de las dimensiones del reactor, ya que en cualquier proceso fotocatalítico se debe de garantizar que el máximo número posible de fotones útiles que llegan a dicho reactor es utilizado por el mismo, evitando que los fotones salgan sin

interceptar una partícula objeto de absorción de radiación. (BLANCO *et al.*, 2001).

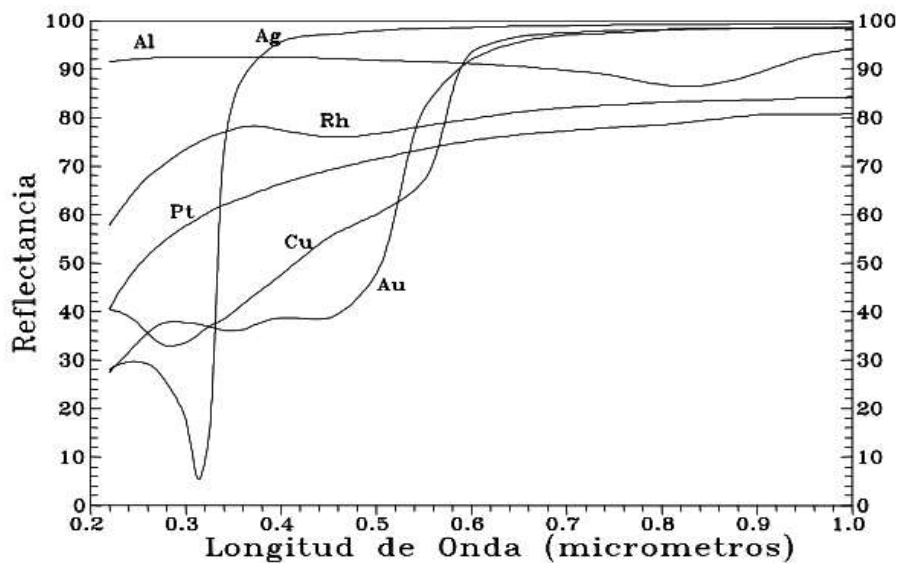
#### **2.4.4.3. Tiempo de residencia**

El tiempo de residencia es un parámetro altamente relevante, tiempo en el que el fluido está expuesto a la radiación en su paso por el reactor. En el caso de reactores con recirculación, aquellos que exceden notablemente el tiempo de residencia, donde resulta necesario una serie de ciclos para alcanzar la degradación del contaminante puede no ser tan relevante. Pero sí se trata de un parámetro fundamental cuando el proceso fotocatalítico es lineal con un único paso por el reactor, ya que en este último hay que conseguir que el tiempo de residencia en el reactor sea, cuando menos, igual al tiempo requerido por el proceso fotocatalítico (BLANCO *et al.*, 2001).

#### **2.4.5. Materiales para diseños de reactores**

Los materiales usados en aplicaciones fotocatalíticas tienen mucho en común con los usados normalmente para aplicaciones solares térmicas, pero los diseños deben diferenciarse en:

- El material del reactor debe ser transparente de modo que el fluido quede expuesto a la radiación UV.
- No es necesario un aislamiento térmico, debido a que la temperatura no representa un papel significativo en los procesos fotocatalíticos.



Fuente. BLANCO *et al.*, 2001.

Figura 11. Reflectancia espectral de diferentes metales electro-depositados al vacío.

#### 2.4.5.1. Superficie reflectante

Esta superficie tiene por objeto dirigir y reflejar la luz útil hacia el reactor para conseguir un máximo aprovechamiento de ésta y evitar pérdidas innecesarias, debiendo estar compuesta por un material que sea altamente efectivo para la reflexión de la radiación ultravioleta. El aluminio es el material más adecuado puesto que presenta valores altos de reflectividad, 92.3 % a 280 nm y 92.5% a 385 nm (CABRERA, 2013); considerando además que es un material de bajo costo (CÁCERES, 2002). Las superficies actualmente disponibles que mejor cumplen estos requerimientos son aluminio anodizado electropulido (Blanco *et al.*, 2000; Malato *et al.*, 1996; Marqués *et al.*, 1996; Vidal *et al.*, 1999, citado por CÁCERES 2002).

#### 2.4.5.2. Fotorreactor

La necesidad de tener una elevada transmisividad en el UV y una elevada resistencia a la degradación hace que las posibilidades de elección sean limitadas. Entre las posibles alternativas se encuentran los fluoropolímeros (inertes químicamente, con buena transmisividad y resistencia y buenos difusores de luz UV), materiales acrílicos y varios tipos de vidrio necesariamente con bajo contenido en hierro ya que este absorbe UV. El vidrio de borosilicato es, probablemente, el material más utilizado y la mejor opción (Blanco 2000, citado por CABRERA, 2013), por tener bajos contenidos de hierro, buenas propiedades de transmisivas del espectro solar (Curcó *et al.*, 1996; Marquéz *et al.*, 1996; Vidal *et al.*, 1999; citado por CÁCERES, 2002). Los valores prácticos para fotorreactores tubulares van a estar normalmente entre 20 y 50 mm de diámetro (BLANCO *et al.*, 2001).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Ubicación**

El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Calidad Del Agua, de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Ubicado en la ciudad de Tingo, del Distrito de Rupa Rupa, Provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco. Geográficamente con coordenadas UTM-WGS: 84 390699.75 E, 8970220.52S, Zona 18S.

Así mismo la ubicación de la toma de muestra del lixiviado se realizó en el botadero municipal San Juan de Tulumayo Alto, al sur oeste del distrito de San Ramón, provincia de Chanchamayo, región Junín; con coordenadas UTM-WGS: 84 462447E y 8767874N, Zona 18S.

#### **3.2. Materiales y equipos**

##### **3.2.1. Materiales**

Materiales del reactor: se utilizó 1 Cubeta de 4 L, lámina de aluminio comercial, tubo de borosilicato de largo 1 metro de 16 mm de diámetro, 4 llaves de paso ½", 2 metros de manguera para agua caliente de ½", tapas rosca para los tubos de borosilicato, teflón, silicona líquida, cinta adhesiva, clavos de 1", lija tipo media.

Materiales de muestreo y laboratorio: cooler de 2.5 L, gel pack de 250 g, envases esterilizados, guantes, mascarilla, gorra, lentes de seguridad, guardapolvo, 4 vasos precipitados de 20 mL, 50 mL, 100 mL y 1 L, vasos precipitados de 100 mL, 2 probetas de 1 L, fiola de 50 mL y 10 mL, pipetas de 2, 5 y 20 mL, varillas de 20 cm, buretas de cristal, perlas de vidrio, Erlenmeyer de 350 mL, 2 placas Petri, pinzas para crisol, cápsulas de evaporación de 50 mL.

Reactivo: agua destilada, oxalato de amonio 0,1 N. concentrado x8, permanganato de potasio 0,1 N concentrado x 10, ácido sulfúrico concentrado 33% v/v; tricloruro férrico hexahidrato  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , concentrado al 98% y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) concentrado al 50%.

### **3.2.2. Equipos**

Se utilizó una balanza analítica, potenciómetro marca EXTECH modelo 407227, oxímetro HANNA HI 9146-04, Luxómetro BI-RANGO-3251, instrumento multiparámetro MILWAUKEE MI180Banch, estufa eléctrica, cámara fotográfica Lumix DMC-S3, desecador provisto de un desecante, estufa eléctrica, para operar de 103 a 105°C, mufla eléctrica para operar a 500°C.

### **3.3. Métodos**

Se trabajó con un único lote de lixiviados con el objetivo de evitar variaciones en los parámetros físico-químicos y microbiológicos.

### 3.3.1. Muestreo y caracterización de lixiviado

El muestreo se realizó según el Protocolo de Monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua-DGCRH.



Figura 12. Toma de muestras para la caracterización.

El protocolo establece lineamientos generales y recomendaciones de muestreo para la determinación de cada parámetro.

Las muestras para la caracterización de los parámetros del lixiviado fueron transportadas en un cooler, refrigerados con un gel pack a 4°C y fueron analizadas de inmediato una vez llegado al laboratorio. Sin embargo las muestras para la experimentación en el proceso Foto-Fenton no se mantuvo con hielo debido a la cantidad de muestra trasladada que fue de 10 galones, distribuidos en 2 envases de 5 galones cada uno, equivalentes a 37.85 litros. Para mayor seguridad las tapas se fijaron con cinta adhesiva evitando derrames de lixiviado en el traslado.

### 3.4. Descripción del Reactor

Para obtener mayor captación de irradiación solar se consideró los ángulos de azimut y altura solar de los meses de abril a septiembre. Las horas evaluadas fueron de 10:00 am a 14:00 pm. Se decidió seguir los datos establecidos por el centro de estudios de la energía solar (CENSOLAR, 2013).

El tubo de borosilicato se ubicó en el foco del colector parabólico, que tiene como base la ecuación  $X^2 = 20y$ , la reflectancia del aluminio en promedio es de 0.85, la transmitancia del fotorreactor de 0.9. Se describe detalles del reactor en el apartado de ANEXOS.

### 3.5. Relaciones molares de Fe: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

La dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se calcula suponiendo una oxidación de materia orgánica completa, basándose en una relación estequiométrica de:

$$1\text{g DQO} = 1\text{g O}_2 = 0.00125\text{ mol O}_2 = 0.0625\text{ mol H}_2\text{O}_2 = 2.125\text{ g H}_2\text{O}_2$$

$$1\text{ g DQO} = 2.125\text{ g H}_2\text{O}_2$$

### 3.6. Análisis de los parámetros físico-químicos y microbiológicos

#### 3.6.1. Radiación

La irradiación solar se determinó utilizando un luxómetro marca ANAHEIM SCIENTIFIC debidamente calibrada, Modelo H100 Ligh Meter. Con la lectura del luxómetro se determina la energía acumulada utilizando la expresión:

$$E_{UV,n} = E_{UV,n-1} + \Delta t_n UV_{G,n} \left( \frac{A}{V} \right); \Delta t_n = t_n - t_{n-1}$$



Donde:

$E_{UV,n}$  = Energía acumulada por unidad de volumen del reactor.

$UV_{G,n}$  = radiación útil incidente

$\Delta t_n$  = intervalo de tiempo de las mediciones

$A$  = superficie exterior del reactor

$V$  = volumen del reactor

### **3.6.2. Índice de oxidabilidad al permanganato – UNE-EN ISO 8467, comité técnico AEN/CTN 77- AENOR**

Se determinó la Oxidabilidad al Permanganato por método volumétrico, este indicador se encuentra en la norma española UNE-EN ISO 8467, elaborado por el comité técnico AEN/CTN77 Medio ambiente cuya secretaria desempeña la AENOR (ROJAS, 2008).

### **3.6.3. Temperatura - Método electrométrico**

Se determinó usando el termómetro marca EXTECH modelo 407227 adecuadamente calibrado. De acuerdo al METODO 2550, de APHA-AWWA-WEF (2012).

### **3.6.4. Determinación del potencial de hidrógeno**

Se determinó usando el potenciómetro marca EXTECH modelo 407227 adecuadamente calibrado. De acuerdo al METODO 4500-H+B, de APHA-AWWA-WEF (2012).

### 3.6.5. Conductividad - Método electrométrico

Se determinó usando el conductímetro marca EXTECH modelo 407227 adecuadamente calibrado. De acuerdo al METODO 2510 y 2520 de APHA-AWWA-WEF (2012).

### 3.6.6. Sólidos totales secados a 103 – 105 °C – APHA: 2540 B

Se calentó la placa limpia a 103 – 105°C durante una hora. Se pesó inmediatamente antes de usar. El volumen elegido de muestra fue de 30 mL. Se transfirió el volumen medido de muestra bien mezclado a la placa pesada previamente y se evaporó hasta secarse en un horno de secado. Se redujo la temperatura hasta 2°C aproximadamente por debajo del punto de ebullición, a fin de evitar salpicaduras. Se secó la muestra evaporada al menos durante una hora a 103 – 105°C, se enfrió la placa en desecador para equilibrar la temperatura y pesar. Se repitió el ciclo de secado, enfriado, desecación y pesado hasta obtener un peso constante.

Cálculo:

$$mg \text{ de sólidos totales/L} = \frac{(A - B) \times 1000}{vol. \text{ de muestra, mL}}$$

Donde:

A = peso de residuo seco + placa, mg y

B = peso de la placa, mg.

### 3.6.7. Sólidos totales disueltos secados a 180°C – APHA:2540 C

Se preparó el disco de filtrado y se insertó con la cara rugosa hacia arriba en el aparato de filtrado. Una vez hecho el vacío se lavó el disco con volúmenes de 20 mL de agua destilada y se desechó el agua de lavado.

Se eligió 30 mL como volumen de muestra, se filtró el volumen de muestra bien mezclada. Se transfirió el producto a una placa de evaporación y se evaporó hasta secar en un baño de vapor. Se secó al menos durante una hora en un horno a 180°C ± 2°C, se secó en un desecador para equilibrar la temperatura y se procedió a pesar. Se repitió el ciclo de pesado, desecación, pesado hasta obtener una peso constante.

Cálculo:

$$mg \text{ de sólidos totales disueltos/L} = \frac{(A - B) \times 1000}{vol. \text{ de muestra, mL}}$$

Donde:

A = peso de residuo seco + placa, mg y

B = peso de la placa, mg.

### 3.6.8. Sólidos totales en suspensión secados a 103 – 105°C – APHA: 2540 D

Se preparó el disco de filtrado, se insertó con la cara rugosa hacia arriba en el aparato de filtrado. Se hizo el vacío y se lavó el disco con tres volúmenes sucesivos de 20 mL de agua destilada. Alternativamente, se procedió a secar las planchetas en un horno a 103 – 105 °C durante una hora, se enfrió en un horno desecador para equilibrar la temperatura y se procedió a

pesar. Se eligió 30 mL como volumen de la muestra, se montó el aparato de filtrado humedeciéndola para con una pequeña cantidad de agua destilada. Se filtró el volumen de muestra bien mezclada. Se lavó con tres volúmenes sucesivos de 10 mL de agua destilada, permitiendo el drenaje completo del filtro entre los lavados. Se separó cuidadosamente con una pinza el filtro del aparato y se trasladó a una plancheta. Se secó en el horno a 103 – 105°C al menos durante una hora, se enfrió en un desecador para equilibrar la temperatura y se procedió a pesar, se repitió el ciclo del secado, enfriamiento, desecación hasta obtener un peso constante.

Cálculo:

$$mg \text{ de sólidos totales en suspensión disueltos/L} = \frac{(A - B) \times 1000}{vol. \text{ de muestra, mL}}$$

Donde:

A = peso del filtro + residuo seco mg y

B = peso del filtro, mg.

### 3.6.9. Enumeración de microorganismos aerobios viables

De la muestra orgánica se seca 10 mL y se deposita en un matraz de 90 mL de caldo peptonado al 0.1% que es la dilución de,  $10^{-1}$ , luego se saca 1 mL y se lleva a un tubo con caldo peptonado con 9 mL que es la dilución  $10^{-2}$ , de igual modo para la dilución  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$ , de la última dilución se saca 1 inóculo de 1 mL y se lleva a una placa esterilizada vacía por duplicada, se adiciona el Agar Platy count y se homogeniza girando 5 veces a la derecha, 5 veces a la izquierda, formando el número 8 y se deja solidificar, luego se encuba a

temperatura de 37°C por el tiempo de 24 – 48 horas. Se hará el conteo respectivo en el contador de colonias y se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{Microorganismo/mL de agua} = \text{Número de colonias} \times \text{inoculo de siembra} \times \text{factor de la dilución}$$

Se saca el promedio de las 2 placas y se encuentra el número de microorganismos.

### **3.6.10. Enumeración de microorganismos coliformes totales (Método número más probable).**

De la muestra orgánica se sacó 10 mL a un matraz de 90 mL de caldo peptonado que es la dilución de  $10^{-1}$ , luego se sacó 1 mL para la dilución de  $10^{-2}$  para la prueba presuntiva, se reporta 1 mL de 3 tubos de caldo Brilla con sus tubitos de Durham – invertido, para las diluciones  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$ . De igual manera se lleva a 35°C – 37°C por 24 – 48 horas, se verificó la producción de gas en los tubitos de Durham cada 24 horas. Se determina el índice NMP de la tabla y se calcula el NMP por 100 mL con la fórmula:

$$\text{NMP/100ml} = \text{índice NMP (tabla)} \times \text{dilución intermedia/100}$$

Para la prueba confirmativa, se utilizó tubos con 9 mL de caldo lactosado con tubos de Durham invertidos, se tomó una asada de los tubos de Brilla positivos a gas y se replica en caldo lactosado. Se llevaron a incubación a 35°C – 37°C por 24 - 48 horas. Se determinó el índice encontrado.

Para la prueba completada, los tubos positivos se siembran en medios sólidos, EMB, agar Mac Conkey, se lleva a incubación a 37°C por 24 horas, si aparece colonias lactosa positivas quiere decir que son coliformes.

### **3.6.11. Enumeración de coliformes termotolerantes – *Escherichia coli* termotolerantes (Método número más probable).**

Se sacó 10 mL de la muestra orgánica y se llevó a un matraz de 90 mL de caldo peptonado al 0.1%, es la dilución  $10^{-1}$ , luego se saca 1 mL para la dilución  $10^{-2}$ . Para la prueba presuntiva, se siembra en 3 tubos con 9 mL de caldo lactosa Bilis Verde brillante (Brilla) o caldo triptosa o lauril sulfato y tubitos de Durham invertidas hasta la dilución de  $10^{-4}$ , se lleva a incubar a 35°C o 37°C por 24 – 48 horas. Se verifica la producción de gas en los tubitos de Durham cada 24 horas.

Para la prueba confirmada, se utilizó tubos con 9ml de caldo de *E. coli* (E.C.) en tubitos de Durham invertido. Se tomó una asada de los tubos Brilla positivos o gas y se repica en caldo *E. coli*. Luego se llevó a incubación 44.5°C – 45.5°C por 24 – 48 horas. Se observó la producción de gas atrapado en los tubitos Durham, se determinó el índice NMP de la tabla y se calculó el NMP por 100mL con la siguiente fórmula:

$$\text{NMP}/100 \text{ mL} = \text{Índice NMP (tabla)} \times \text{dilución intermedia}/100$$

Para la prueba completada, de los tubos positivos se sembró en EMB/ENDO Mac Conkey, se llevó a incubación a 37°C por 24 – 48 horas, las colonias lactosa positivo con brillo metálico se repica en medios del IMVIC,

indol +, rojo de metilo+, Voges Proskauer -, y citrato de Simmons -. Que nos da de reacción *Escherichia coli*.

### **3.6.12. Determinación de *Salmonella***

Para la prueba de pre enriquecimiento, de la muestra se sacó de 10 – 25 mL y se depositó en un matraz de 90 – 225mL de caldo peptonado al 1% y se lleva a incubar a 37°C por 24 – 48 horas. Para la prueba de enriquecimiento selectivo, se sacó 10ml y se siembra en caldo tetracionato y celenito cistina, y se incubó en los matraces entre 42°C – 43°C por 24 – 48 horas. Para la prueba selección, se siembra con ansa en placas con agar verde brillante con rojo de fenol 24 – 48 horas a 37°C, se puede utilizar el Agar SS (Salmonella, Shigella). En el Agar SS se verificó el crecimiento de colonias fermentadoras de lactosa con el centro oscuro. Para la prueba de confirmación presuntivo, se replica en TSI, si da K/A gas (burbujas) es positivo, H<sub>2</sub>S (color negro) si da positivo es salmonella. Para la prueba de confirmación bioquímica, se replica sobre medios de identificación bioquímica. Indol negativo (-); RM positivo (+); VP negativo (-); Urea negativo (-); Citrato positiva (+); Lia descarboxilación positivo (color purpura) K/K.

### **3.6.13. Determinación de *Staphylococcus aureus***

De la muestra orgánica sacó 10 mL y se llevó a un matraz de 90 mL de caldo peptonado al 0.1% que es a dilución 10<sup>-1</sup>; se saca 1mL y se deposita en un tubo con 9 mL de caldo peptonado al 0.1% que es la dilución 10<sup>-2</sup>; de igual manera para la dilución 10<sup>-3</sup> de la última dilución, se sembró con el asa un inóculo de 0.25 mL de manitol salado en placas por estrías, se incubó

a 37°C por 24 – 48 horas. Luego se hizo lectura, si hay fermentación de manitol se observa colores amarillos que va a ser *Staphylococcus aureus*, si son colores blanquecinos son *Staphylococcus epidermis*, se continúa determinando la presencia y/o ausencia.

#### **3.6.14. Determinación de *Vibrio cholerae***

De la muestra orgánica se tomó 10 mL y se deposita en un matraz con 90 mL de cloruro de sodio al 4% que es la dilución de  $10^{-1}$ , luego se saca 1mL y se lleva a un tubo con 9 mL de NaCl de es la dilución de  $10^{-2}$ , de igual manera para la dilución  $10^{-3}$ . Luego se hace el proceso de inoculación en tubos con caldo GSTB (caldo de TEEPOL, sal y glucosa) por cada dilución, incubar a 35°C por 18 horas.

Se sembró en agar tiosulfato citrato bilis sacarosa (TCBS) por estrías de 24 – 48 horas, verificar los resultados donde se verá colonias redondas de 3mm con centro azul, verde o amarillo.

Se realizó el conteo por presencia y ausencia, a la vez pruebas bioquímicas (TSI: A/A, sin gas, sin H<sub>2</sub>S)

#### **3.6.15. Numeración de fungi (mohos y levaduras)**

De la muestra orgánica se sacó 10 mL y se llevó a un matraz de 90 mL de caldo peptonado al 0.1% que es a dilución  $10^{-1}$ ; se saca 1mL y se deposita en un tubo con 9 mL de caldo peptonado al 0.1% que es la dilución  $10^{-2}$ ; de igual modo para la dilución  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$  de la última dilución, se llevó a placas vacías esterilizadas un inóculo de 1mL, luego se adicionó de 10 a 20 mL de Agar Sabraud glucosada al 4% más antibióticos, se homogenizó 5 veces a



la derecha, 5 veces a la derecha formando un 8, Se dejó solidificar las placas con el medio Sabraud, se llevó a incubar a temperatura ambiente por las de 72 horas, verificando la presencia de colonias fungi.

Se identificó por medio del microcultivo que consiste en una placa Petri contenido un soporte de vidrio en forma de herradura, un porta objeto y un cubre objeto, todos bien esterilizados.

Para la placa Petri con medio de Agar Sabraud – glucosa de 4% dividido en cubitos de 20 x 20 x 10 mm, cada cubito se colocó sobre la porta objeto dentro de la placa de microcultivo. Se necesita el cultivo primario de un fungi aislado de la muestra de investigación, se eligió la colonia de fungi con la ayuda de una onza micológica, se tomó un inculo de la misma y se trasladó sobre el cubito del medio de Sabraud que se ha colocó sobre el porta objeto dentro de la placa de microcultivo. Luego se colocó el cubre objeto sobre el cubito de Agar, poner dentro de la placa un algodón húmedo, seguidamente se llevó la placa de microcultivo a incubar a temperatura ambiente por 3 o 5 días. Cada día se verificó si el algodón aún sigue húmedo. Al término de la incubación, con ayuda de una pinza se retiró suavemente el cubre objeto de la placa de microcultivo y se colocó sobre un porta objeto limpio y desengrasado, al que se le ha colocó previamente 2 o 3 gotas de azul Amman con papel secante, se quitó el exceso de colorante, seguidamente se selló los lados con bálsamo de Canadá diluido o esmalte de uña transparente. Luego se eliminó el cubito de media Sabraud llevándole a un recipiente con solución sulfocrómica, luego se retiró el porta objeto de la placa de microcultivo y se agregó de 2 a 3 gotas de azul de Amman, se añadió un cubre objeto limpio y desengrasado con

papel secante que absorberá el exceso de colorante. Finalmente se selló los lados laterales con bálsamo de Canadá diluido o esmalte de uña transparente. El reconocimiento se realizó en un microscopio con el objetivo de 40X.

### 3.7. Evaluación de diferentes dosis de Fe (III):H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

#### 3.7.1. Diseño experimental

Cuadro 5. Diseño de 2 factores con tres niveles.

Tiempo	pH = 3		
	Relación molar Fe(III):H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> de 1:15	Relación molar Fe(III):H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> de 1:25	Relación molar Fe(III):H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> de 1:35
10 min	Tratamiento 1	Tratamiento 4	Tratamiento 7
20 min	Tratamiento 2	Tratamiento 5	Tratamiento 8
30 min	Tratamiento 3	Tratamiento 6	Tratamiento 9

Se utilizó el diseño de 2 factores con tres niveles. (Factorial 3x3) el cual consta de nueve unidades experimentales. Se evaluó a un rango de pH=3, tres tiempos de residencia de 10, 20 y 30 minutos y tres relaciones molares diferentes de Fe (III)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 1:15, 1:25 y 1:35.

### 3.7.2. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó a un nivel de confianza del 95% con valor de  $\alpha=0.05$ . Se confirma el nivel de significancia con la prueba Tukey.

Cuadro 6. Cuadro de análisis de varianza.

FV	GL	SC	Fc	Signif.
Tiempo	SS <sub>A</sub>	a - 1	MS <sub>A</sub> /MS <sub>E</sub>	F <sub>c</sub> > F <sub>t</sub>
Relación molar	SS <sub>B</sub>	b - 1	MS <sub>B</sub> /MS <sub>E</sub>	
Interacción	SS <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	MS <sub>AB</sub> /MS <sub>E</sub>	
Error	SS <sub>E</sub>	ab(n-1)		
Total	SS <sub>T</sub>	abn - 1		

### 3.8. Variables

#### 3.8.1. Variables independientes

- pH
- Tiempo de retención hidráulica (10, 20 y 30 minutos)
- Relación molar de Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1:15, 1:25 y 1:35)

#### 3.8.2. Variables dependientes

- Índice de oxidabilidad Mn<sup>4+</sup> (mgO<sub>2</sub>/L)
- Temperatura (°C)
- Potencial eléctrico (mV)
- Sólidos totales (ST) (mg/l)

- Sólidos totales disueltos (STD) (mg/L)
- Sólidos totales en suspensión (STS) (mg/L)
- Enumeración de microorganismos aerobios viables (UFC/mL)
- Coliformes totales (NMP/100mL)
- Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)
- Salmonella (Presencia/Ausencia)
- *Staphylococcus aureus* (Presencia/Ausencia)
- *Vibrio cholerae* (Presencia/Ausencia)

Numeración de Fungi (UFC/mL)

### **3.8.3. Variables interviniente**

- Irradiación solar (Ix/m<sup>2</sup>)
- Humedad
- Temperatura ambiental (°C)

## **3.9. Flujograma del proceso**

La experimentación inicia con el filtrado de la muestra de lixiviado por una malla con celdas de 1 mm x 1 mm. Se tomó la cantidad de 3 litros y se caracterizó los parámetros iniciales. Se modificó el pH inicial hasta un pH=3 adicionando ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>); se determinó la dosis de peróxido de hidrógeno y la cantidad de Fe (III) a utilizar. Se adicionó la el Fe (III) en forma de FeCl<sub>3</sub>6H<sub>2</sub>O, se realizó una homogenización manual para adicionar el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y nuevamente se homogenizó por 15 minutos. Todo esto dentro del laboratorio a una temperatura aproximada de 25°C. La mezcla preparada se cubrió con una cartulina negra para evitar que la luz visible entrara en contacto.

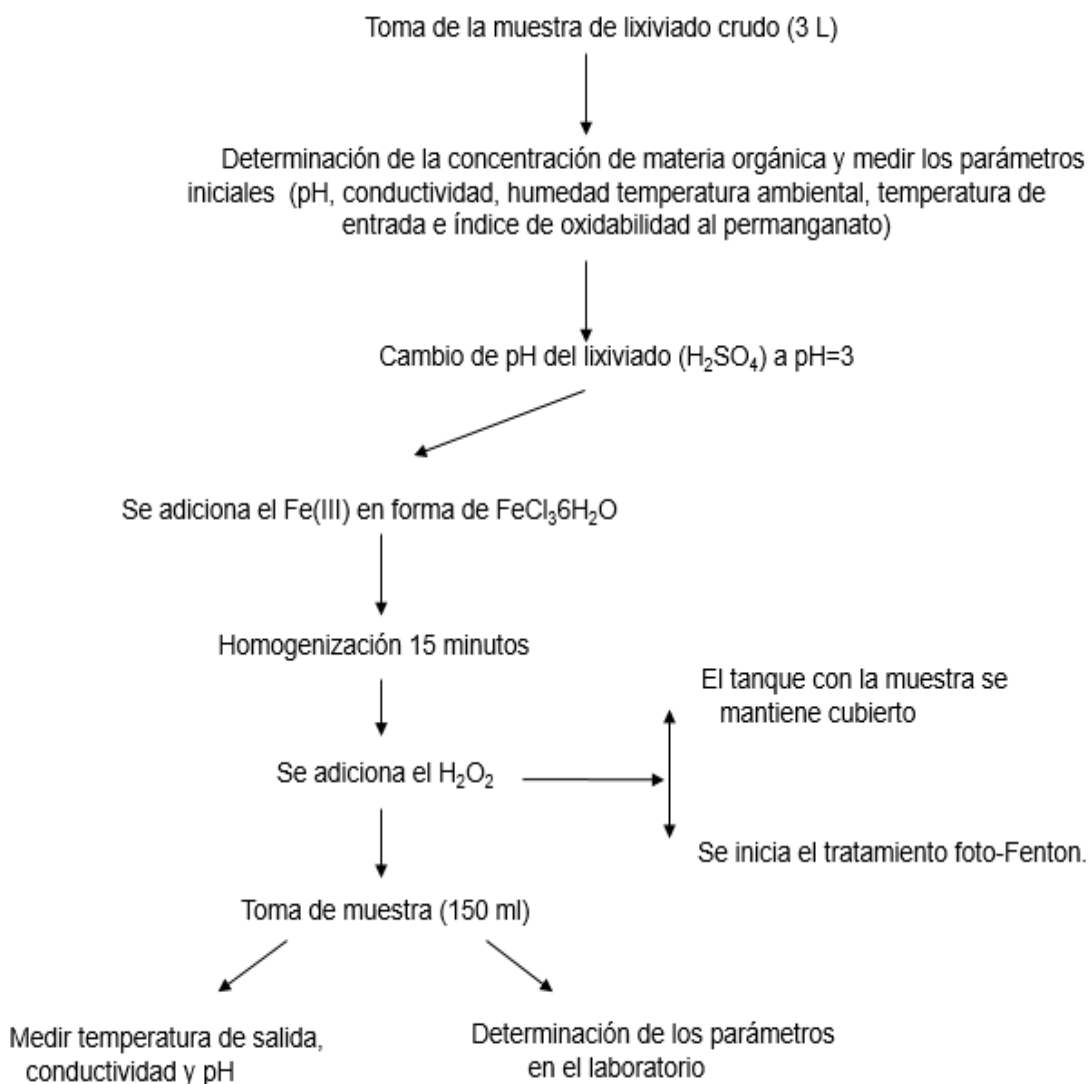


Figura 13. Flujograma del proceso para el tratamiento de oxidación avanzada.

Se tomó la lectura de irradiancia con el luxómetro colocado en el mismo ángulo de inclinación que el reactor. Después del tiempo establecido se tomó la muestra de 150 mL de lixiviado y se caracterizó los parámetros finales.

## IV. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados experimentales del proceso Foto-Fenton aplicado al lixiviado del botadero municipal San Juan de Tulumayo Alto del distrito de San Ramón, provincia de Chanchamayo, Junín, Perú.

### 4.1. Caracterización físico-química y microbiológica del lixiviado

Se obtuvo los siguientes resultados:

Cuadro 7. Parámetros físicos químicos iniciales del lixiviado.

Parámetros	Unidades	Cantidad	CV (%)
Índice de oxidabilidad Mn <sup>4+</sup>	mgO <sub>2</sub> /L	2668.11	0.07
Temperatura	°C	24	0.02
pH	H <sup>+</sup>	8.12	0.04
Conductividad	mV	21.50	0.02
ST	mg/L	4933.30	0.00
SDT	mg/L	4866.70	0.00
SST	mg/L	66.70	0.01

En caracterización microbiológica se obtuvo:

Cuadro 8. Parámetros microbiológicos iniciales del lixiviado

Parámetros microbiológicos	Unidades	Cantidad
Enumeración de microorganismos aerobios viables	UFC/mL	54 x 10 <sup>3</sup>
Coliformes totales	NMP/100mL	0
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	23
<i>Salmonella</i>	-	Ausencia
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	Presencia
<i>Vibrio cholerae</i>	-	Presencia
Numeración de fungi	UFC/mL	6 x 10 <sup>3</sup>

#### 4.2. Evaluación de diferentes relaciones molares en la degradación de lixiviado

Uno de los pasos iniciales para el proceso Foto-Fenton es la determinación de las cantidades de reactivo a utilizar. Las relaciones molares para la experimentación son de 1:15, 1:25 y 1:35 de Fe: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

El valor del índice de oxidabilidad inicia con una medida de 2.451 incrementándose a 2.738 y 2.815 g/L. Con estos datos se hallan la cantidad en gramos de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a utilizar en el proceso Foto-Fenton, los cuales superan los 5 g/L equivalente a 10 mL como se observa en el cuadro 10.

Hallado el volumen del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se halla las cantidades en mol/L y se hace la relación molar para las cantidades de Fe (III).

Cuadro 9. Volumen de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a utilizar en los experimentos.

N°	Índice de oxidabilidad del Mn <sup>4+</sup>	Equiv.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g/L)	Densidad del H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Volumen (mL)
1	2.45	2.12	5.21	0.51	10.21
2	2.73	2.12	5.82	0.51	11.40
3	2.81	2.12	5.98	0.51	11.73

Cuadro 10. Cantidad de Fe(III) a utilizarse en cada experimento.

Trat.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g/L)	Volumen (mL)	mol/L	Relación Molar Fe	FeCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O PM= 278	Cantidad de Fe (g/L)
1	5.21	10.21	0.15	1:15	0.01	2.65
2	5.82	11.40	0.17	1:15	0.01	2.96
3	5.98	11.73	0.18	1:15	0.01	3.05
4	5.21	10.21	0.15	1:25	0.01	1.59
5	5.82	11.40	0.17	1:25	0.01	1.78
6	5.98	11.73	0.18	1:25	0.01	1.83
7	5.21	10.21	0.15	1:35	0.00	1.14
8	5.82	11.40	0.17	1:35	0.01	1.27
9	5.98	11.73	0.18	1:35	0.01	1.31



#### 4.2.1. Irradiancia acumulada

El tiempo de exposición de los lixiviados a radiación solar fue de 10, 20 y 30 minutos, el promedio de las medidas acumuladas de irradiación solar para cada uno de los experimentos son:

Cuadro 11. Promedio de irradiancia acumulada de los tratamientos.

Experimento	Irradiancia	Irradiancia	Irradiancia
	acumulada lx/m <sup>2</sup>	acumulada lx/m <sup>2</sup>	acumulada lx/m <sup>2</sup>
	10 minutos	20 minutos	30 minutos
1	1465.86	2949.00	4771.94
2	1520.86	3159.63	4819.80
3	1561.91	3176.75	4822.33
4	1594.87	3221.92	4871.78
5	1596.93	3224.29	4872.73
6	1626.73	3251.87	4905.86
7	1628.47	3273.27	4906.81
8	1642.42	3299.58	4956.73
9	1647.01	3363.45	5043.90

Para las medidas de irradiancia solar acumulada se obtuvo un máximo de 1647.01 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 1465.86 lx/m<sup>2</sup> para el tiempo de 10 minutos; un máximo de 3363.45 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 2949.00 lx/m<sup>2</sup> para el

tiempo de 20 minutos; un máximo de 5043.90 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 4771.94 lx/m<sup>2</sup> para el tiempo de 30 minutos.

Cuadro 12. Análisis de varianza para valores de irradiancia acumulada.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.	Sig.
Tiempo	4.89647E7	2	2.44824E7	3418.82	0.00	**
Fracción molar	39464.3	2	19732.2	2.76	0.09	
Interacción	23372.1	4	5843.01	0.82	0.53	
Error experimental	128899.	18	7161.06			
Total	4.91565E7	26				

Cuadro.13. Prueba Tukey para Irradiancia acumulada por Tiempo de retención

Tiempo de retención	Media (lx/m <sup>2</sup> )	Grupos Homogéneos
10	1587.23	X
20	3213.31	X
30	4885.76	X

La prueba estadística Tukey me permite confirmar a 95% de confianza que las medias de los tiempos de retención difieren entre los tratamientos para la irradiancia acumulada, por lo que resultan estadísticamente significativo, en contraposición al factor fracción molar que no

presenta diferencia significativa entre las dosis aplicadas entre los tratamientos como se observa en el cuadro 12.

#### 4.2.2. Relación de la irradiancia acumulada con los parámetros físico-químicos evaluados

##### 4.2.2.1. Potencial hidrógeno (pH)

En la figura 14 se observa el comportamiento del pH para cada una de las pruebas realizadas ordenadas según la acumulación de energía para cada tratamiento. Se obtuvo un valor máximo de pH=2.78 con 1623.45 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de pH=2.54 con 1600.42 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el tiempo de 10 minutos; un máximo de pH=2.8 con 3274.90 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de pH=2.51 con 3110.18 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el periodo de 20 minutos; un máximo de pH=2.88 con 4907.55 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de pH=2.52 con 4866.13 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el lapso de 30 minutos.

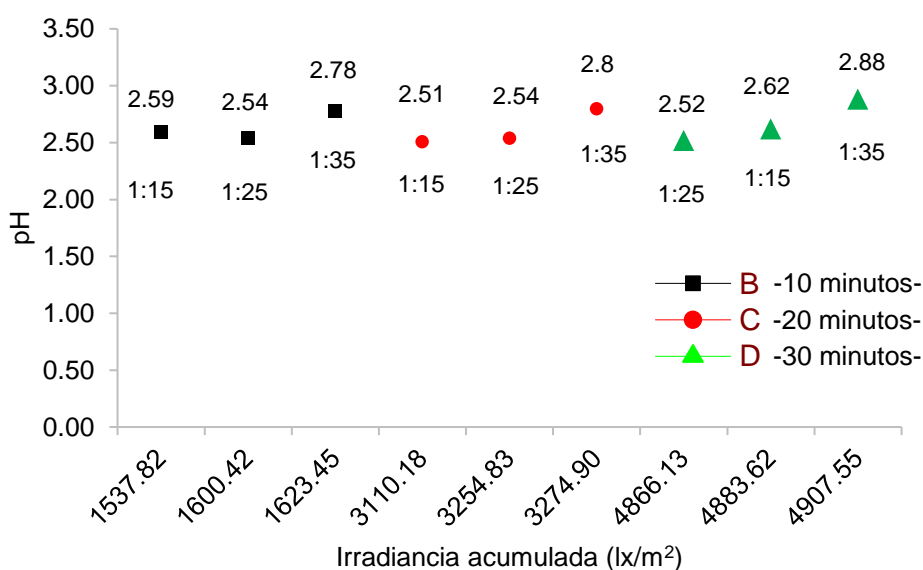


Figura 14. Comportamiento del pH en el proceso foto-Fenton

Cuadro 14. Análisis de varianza para los valores de pH.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.	Signif.
Tiempo	0.0158296	2	0.00791481	1.10	0.36	
Relación molar	0.436896	2	0.218448	30.29	0.00	**
Interacción	0.0232593	4	0.00581481	0.81	0.54	
Error experimental	0.1298	18	0.00721111			
Total	0.605785	26				

Cuadro 15. Prueba Tukey para pH por relación molar.

Relación molar	Media (pH)	Grupos Homogéneos
1:25	2.53	X
1:15	2.57	X
1:35	2.82	X

La prueba estadística Tukey me permite confirmar a 95% de confianza que las medias de las relaciones molares difieren entre los tratamientos para el pH, por lo que resultan estadísticamente significativo, en contraposición al tiempo de retención que no presenta diferencia significativa entre los tiempos aplicados para los tratamientos.

#### 4.2.2.2. Potencial eléctrico

Las medidas de potencial eléctrico por su parte tienen un valor inicial de 21.5 mV, y varían considerablemente con la aplicación del proceso

foto-Fenton. Se obtuvo un valor máximo de 268 mV con 1600.42 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 256 mV con 1623.45 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el tiempo de 10 minutos; un máximo de 274 mV con 3254.83 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 253 mV con 3274.90 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el periodo de 20 minutos; un máximo de 271 mV con 4866.13 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 250 mV con 4907.55 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el lapso de 30 minutos.

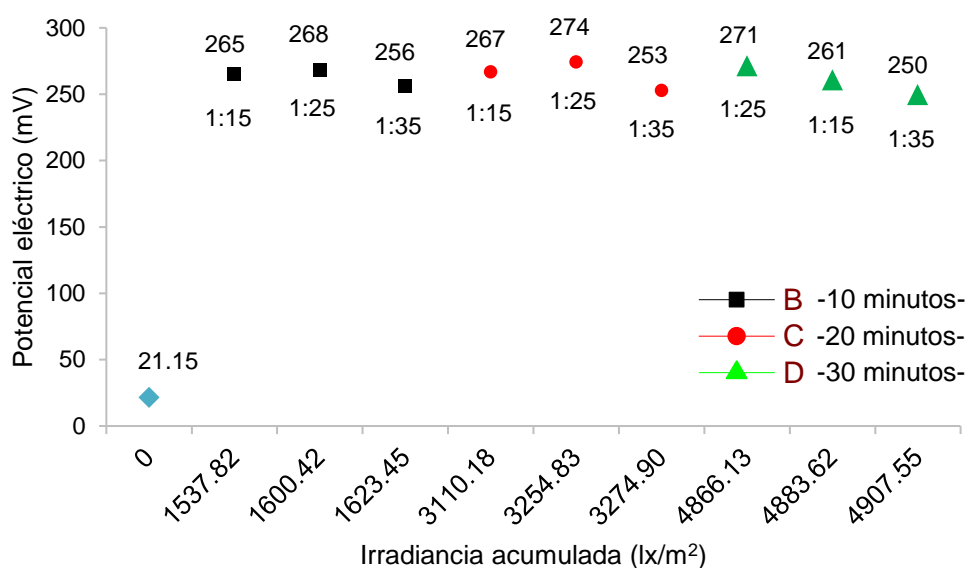


Figura 15. Comportamiento de la conductividad en el proceso Foto-Fenton.

Cuadro 16. Análisis de varianza para valores de potencial eléctrico.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif	Signif.
Tiempo	73.1852	2	36.5926	2.49	0.11	
Fracción molar	1557.63	2	778.815	53.10	0.00	**
Interacción	104.815	4	26.2037	1.79	0.18	
Error experimental	264.0	18	14.6667			
Total	1999.63	26				

Cuadro 17. Prueba Tukey para potencial eléctrico por relación molar.

Relación molar	Media (mV)	Grupos Homogéneos
1:35	252.78	X
1:15	264.11	X
1:25	271.22	X

La prueba estadística Tukey me permite confirmar a 95% de confianza que las medias de las relaciones molares difieren entre los tratamientos para el potencial eléctrico, por lo que resultan estadísticamente significativo, en contraposición al tiempo de retención que no presenta diferencia significativa entre los tratamientos aplicados.

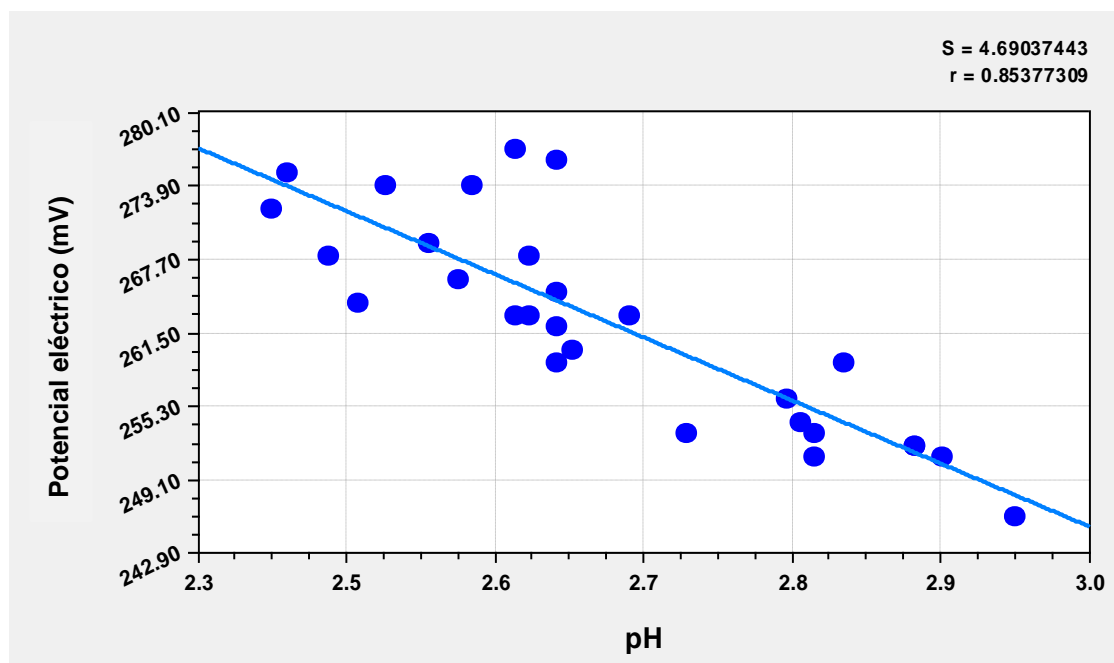


Figura 16. Relación del potencial eléctrico y el pH en el proceso Foto-Fenton.

Los valores de pH y potencial eléctrico muestran una relación inversamente proporcional tal como se muestra en la Figura 16. La línea de

tendencia para esta relación tiene un error estándar de 4.7 y un coeficiente de correlación de 85 %.

#### 4.2.2.3. Temperatura

Los experimentos se realizaron en días despejados para tener medidas constantes entre repeticiones y pruebas. En la Figura 16 se presenta las medidas de temperaturas ambientales, temperatura de entrada y temperatura de salida. Los valores iniciales de temperatura se incrementaron en un máximo de 2.8 °C y un mínimo de 1.40 °C.

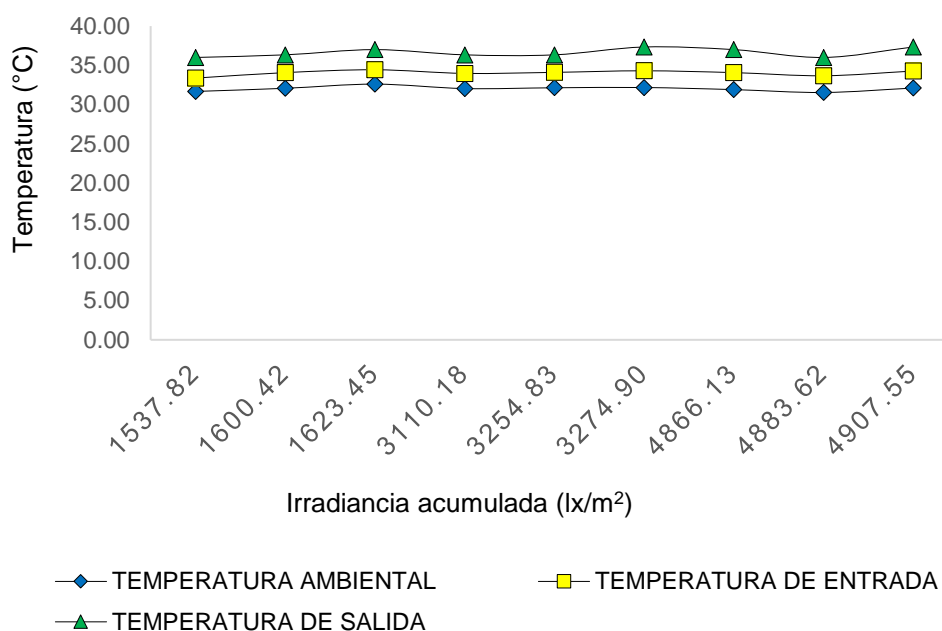


Figura 17. Comportamiento de la temperatura en el proceso Foto-Fenton.

La temperatura de salida registró un valor máximo de 37°C con 1623.45 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 36°C con 1537.82 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el tiempo de 10 minutos; un máximo de 37.33°C con 3274.90 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 36.33°C con 3111.18 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para

el periodo de 20 minutos; un máximo de 37.33°C con 4907.55 lx/m<sup>2</sup> y un mínimo de 36.00°C con 4883.62 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada para el lapso 30 minuto de exposición solar.

Cuadro 18. Análisis de varianza para los valores de temperatura de entrada.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.
Tiempo	0.134074	2	0.067037	0.15	0.86
Fracción molar	2.0363	2	1.01815	2.24	0.13
Interacción	0.454815	4	0.113704	0.25	0.91
Error experimental	8.16667	18	0.453704		
Total	10.7919	26			

Cuadro 19. Análisis de varianza para los valores de temperatura de salida.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.	Signif.
Tiempo	0.518519	2	0.259259	0.87	0.43	
Relación molar	5.62963	2	2.81481	9.50	0.00	**
Interacción	0.814815	4	0.203704	0.69	0.61	
Error experimental	5.33333	18	0.296296			
Total	12.2963	26				

La prueba estadística Tukey me permite confirmar a 95% de confianza que las medias de las relaciones molares difieren entre los tratamientos para la temperatura de salida, por lo que resultan estadísticamente significativo, en contraposición al tiempo de retención que no presenta diferencia significativa entre las dosis aplicadas para los tratamientos.



Cuadro 20. Prueba Tukey para Temperatura de salida por relación molar.

Relación molar	Media (°C)	Grupos Homogéneos
1:15	36.11	X
1:25	36.56	X
1:35	37.22	X

#### 4.2.2.4. Humedad

La humedad relativa tuvo un valor máximo de 70% y un mínimo de 62% para el tiempo de 10 minutos, también un máximo de 70% y un mínimo de 62% para el periodo de 20 minutos, y finalmente un máximo de 69% y un mínimo de 63% para el lapso de 30 minutos de exposición solar.

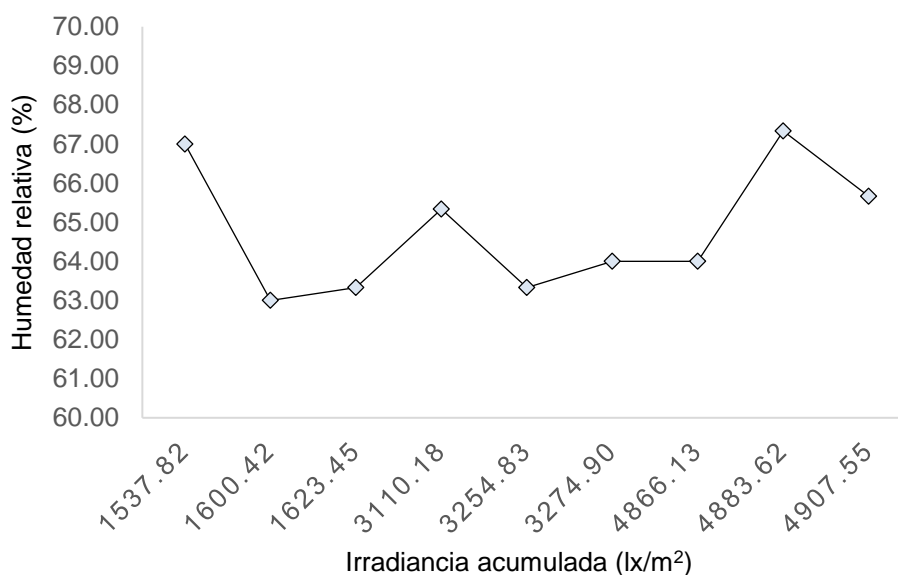


Figura 18. Medidas de humedad relativa en el proceso Foto-Fenton.

Los valores de humedad relativa y temperatura ambiental muestran una relación inversamente proporcional tal como se muestra en la Figura 18. La línea de tendencia para esta relación tiene un error estándar de 1.31 y un coeficiente de correlación de 85 % (Figura 19).

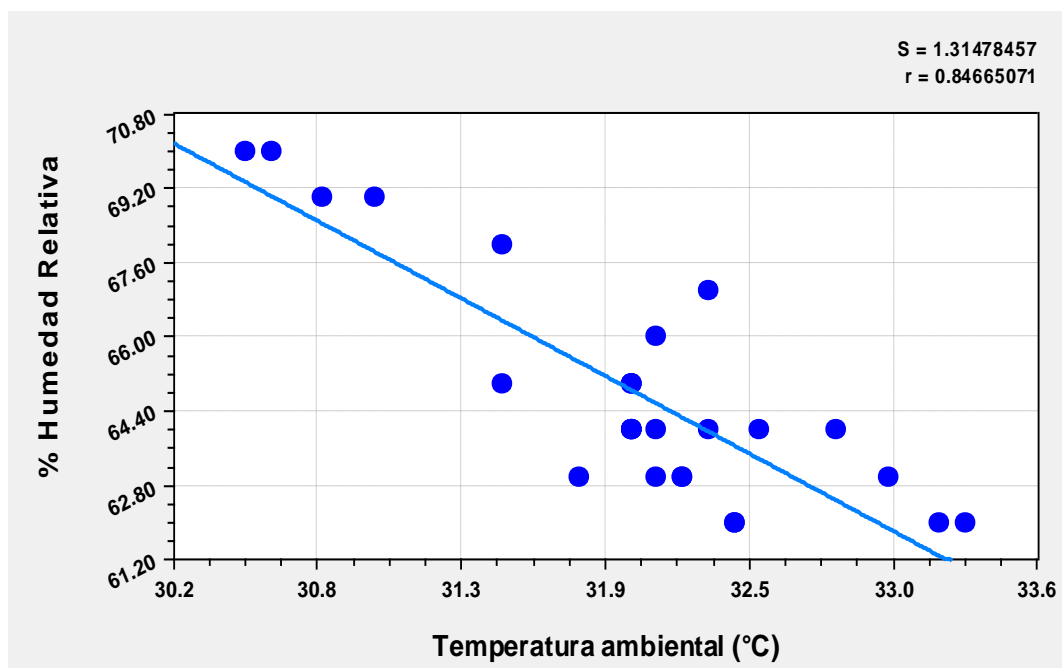


Figura 19. Relación de la humedad relativa y la temperatura ambiental.

#### 4.2.2.5. Sólidos

Para el caso de los sólidos disueltos, suspendidos y totales, los valores se incrementaron en comparación a los valores iniciales del lixiviado crudo. Se obtuvo un valor máximo de 9266.70 mg/L y un valor mínimo de 8200.00 mg/L para los sólidos totales disueltos. De igual manera se obtuvo un valor máximo de 900.00 mg/L y un valor mínimo de 66.70 mg/L para los sólidos totales suspendidos. Por otro lado se encontró un valor máximo de 10033.30 mg/L y un valor mínimo de 8300.00 mg/L para los sólidos totales.

Cuadro 21. Datos de sólidos totales, disueltos y suspendidos en el proceso de oxidación avanzada Foto-Fenton.

N°	Ind. Oxd. al Mn <sup>4+</sup>	Sólidos disueltos mg/L	Sólidos sedimentables mg/L	Sólidos totales mg/L
0	2668.11	4866.70	66.70	4933.30
1	353.15	9266.70	766.70	10033.30
2	264.50	9183.30	833.30	10016.70
3	293.33	9100.00	900.00	10000.00
4	254.27	9033.30	100.00	9133.30
5	153.95	8700.00	233.30	8933.30
6	200.65	9000.00	66.70	9066.70
7	393.51	8233.30	366.70	8600.00
8	340.18	8200.00	100.00	8300.00
9	361.80	8333.30	133.30	8466.70

Todos los experimentos incrementaron los valores para el parámetro de sólidos como se muestra en la Figura 21.

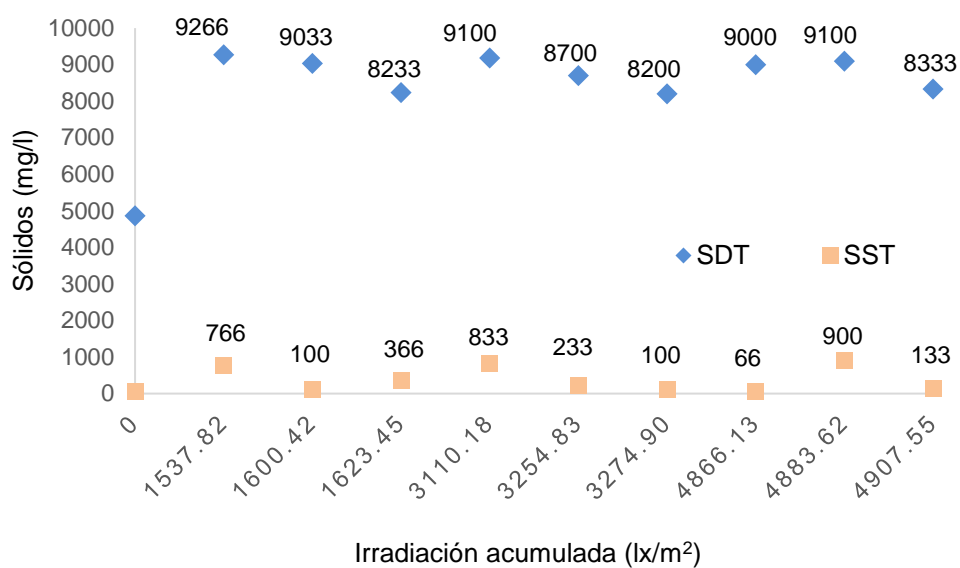


Figura 20. Comportamiento de los sólidos en el proceso Foto-Fenton.

#### 4.2.3. Degradación del lixiviado con las diferentes relaciones molares de Fe: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Para el tiempo de 10 minutos se obtuvo un valor máximo materia orgánica medida como índice de oxidabilidad al permanganato de 406.49 mg/L con 1628.47 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada y un mínimo 238.70 mg/L con 1596.93 47 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada.

Cuadro 22. Resultados de materia orgánica para el tiempo de 10 minutos.

Nº	Hora	Relación molar	Irradiancia acumulada lx/m <sup>2</sup>	Índice oxid. Mn <sup>4+</sup> mg/L
1	10:50	1:15	1520.86	324.32
2	12:02	1:15	1626.73	335.14
3	11:52	1:15	1465.86	400.00

Continuación del Cuadro 22. ...

N°	Hora	Relación molar	Irradiancia acumulada lx/m <sup>2</sup>	Índice oxid. Mn <sup>4-</sup> mg/L
4	11:07	1:25	1561.91	255.57
5	12:23	1:25	1596.93	238.70
6	11:11	1:25	1642.42	268.54
7	12:08	1:35	1628.47	406.49
8	13:25	1:35	1594.87	391.35
9	12:16	1:35	1647.01	382.70

Para el tiempo de 20 minutos se obtuvo un valor máximo materia orgánica medida como índice de oxidabilidad al permanganato de 361.08 mg/L con 3299.58 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada y un mínimo 146.59 mg/L con 3363.45 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada.

Cuadro 23. Resultados de materia orgánica para el periodo de 20 minutos.

N°	Hora	Relación molar	Irradiancia acumulada lx/m <sup>2</sup>	Índice oxid. al Mn <sup>4-</sup> mg/L
10	11:03	1:15	3159.63	315.68
11	12:15	1:15	3221.92	231.35
12	12:09	1:15	2949.00	246.49
13	11:19	1:25	3224.29	158.27

Continuación del Cuadro 23. ...

N°	Hora	Relación molar	Irradiancia acumulada lx/m <sup>2</sup>	Índice oxid. al Mn <sup>4+</sup> mg/L
14	12:32	1:25	3176.75	156.97
15	12:28	1:25	3363.45	146.59
16	13:04	1:35	3251.87	341.62
17	13:36	1:35	3273.27	317.84
18	11:22	1:35	3299.58	361.08

Para el tiempo de 20 minutos se obtuvo un valor máximo materia orgánica medida como índice de oxidabilidad al permanganato de 361.08 mg/L con 3299.58 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada y un mínimo 146.59 mg/L con 3363.45 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada.

Cuadro 24. Resultados de materia orgánica para tiempo de 30 minutos.

N°	Hora	Relación molar	Irradiancia Acumulada	Índice oxid. al Mn <sup>4+</sup>
19	11:29	1:15	4871.78	350.27
20	12:36	1:15	4822.33	317.84
21	12:39	1:15	4956.73	211.89
22	11:50	1:25	4872.73	192.00

Continuación del Cuadro 24...

N°	Hora	Relación molar	Irradiancia acumulada lx/m <sup>2</sup>	Índice oxid. al Mn <sup>4+</sup> mg/L
23	12:52	1:25	4905.86	210.16
24	11:45	1:25	4819.80	199.78
25	12:33	1:35	4906.81	378.38
26	13:26	1:35	4771.94	339.46
27	12:50	1:35	5043.90	367.57

Para el tiempo de 30 minutos se obtuvo un valor máximo materia orgánica medida como índice de oxidabilidad al permanganato de 378.38 mg/L con 4906.81 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada y un mínimo 192.00 mg/L con 4872.73 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia acumulada.

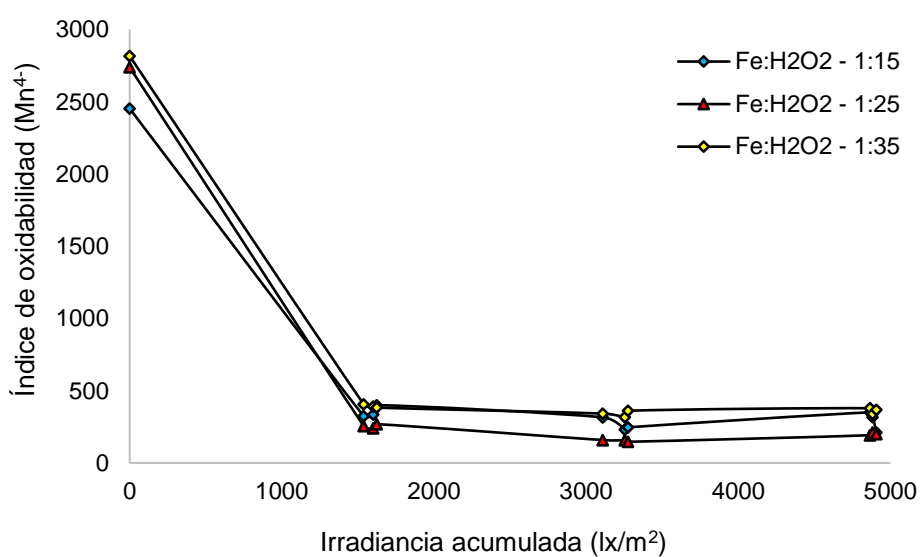


Figura 21. Reducción de la materia orgánica con el tratamiento Foto-Fenton.

En la Figura 21 se observa que la relación molar de 1:25, para cada uno de los tiempos aplicados, tienen valores ser más bajos en materia orgánica medida como el índice de oxidabilidad al permanganato, que las otras relaciones molares de 1:15 y 1:35.

#### 4.3. Eficiencia de remoción de materia orgánica en lixiviado

El tratamiento foto-Fenton reduce considerablemente la materia orgánica a un pH=3 a tiempos de 10, 20 y 30 minutos con relaciones molares de 1:15, 1:25 y 1:35.

Cuadro 25. Reducción de la materia orgánica en lixiviado.

Tiempo	pH = 3		
	Relación molar 1:15	Relación molar 1:25	Relación molar 1:35
	mg/L	mg/L	mg/L
0	2451.89	2737.30	2815.14
10	353.15	264.50	293.33
20	254.27	153.95	200.65
30	393.51	340.18	361.80

Se obtuvo para el experimento 1 el valor de 353.15 mg/L, para el experimento 2 un valor de 264.50 mg/L, para el experimento 3 un valor de 293.33 mg/L, para el experimento 4 un valor de 254.27 mg/L, para el experimento 5 un valor de 153.95 mg/L, para el experimento 6 un valor de 200 mg/L, para el experimento 7 un valor de 393.51 mg/L, para el experimento 8 un



valor de 340.18 mg/L y finalmente un valor de 361.80 mg/L de materia orgánica para el experimento 9.

Cuadro 26. Eficiencia de remoción de materia orgánica en el proceso Foto-Fenton.

pH = 3			
Tiempo	Relación molar 1:15	Relación molar 1:25	Relación molar 1:35
	Remoción (%)	Remoción (%)	Remoción (%)
10	85.60	90.71	86.02
20	89.21	94.38	87.92
30	88.04	92.67	87.15

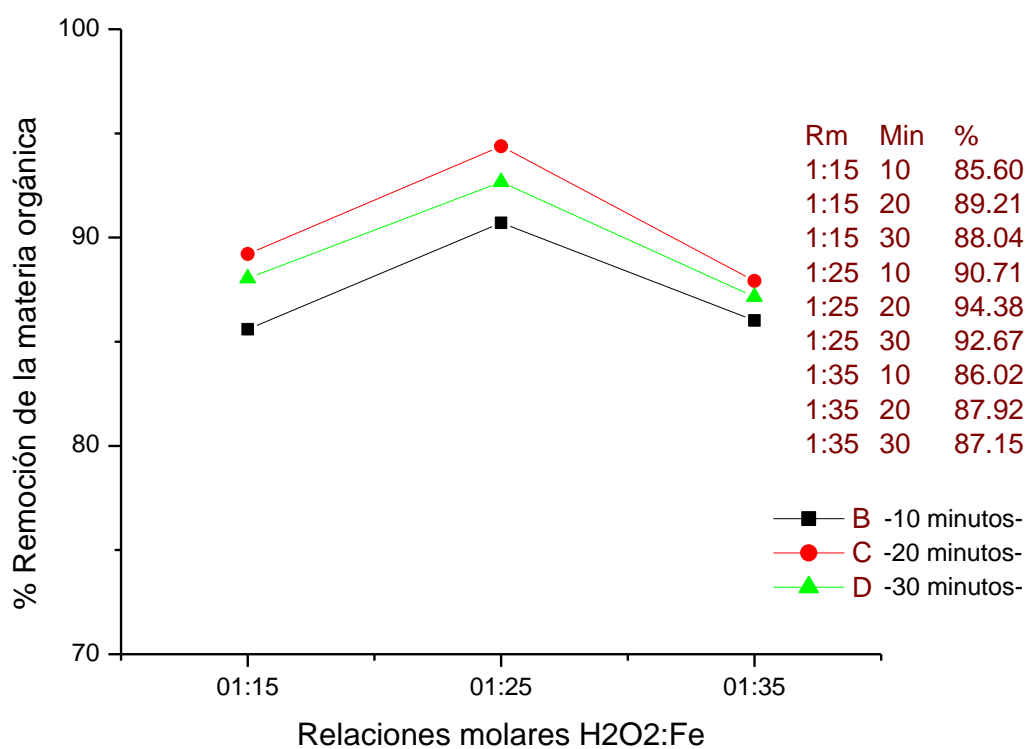


Figura 22. Eficiencia de remoción de materia orgánica en Foto-Fenton.

La eficiencia de remoción de la materia orgánica con el proceso de oxidación avanzada Foto-Fenton, fue más del 85%. Se obtuvo una mayor remoción con la dosis de 1:25 de Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con un tiempo de 20 minutos.

La máxima eficiencia de remoción alcanzada fue de 94.38 % con dosis de 1:25 y tiempo de 20 minutos, el mínimo que se observó fue de 85.60% con la dosis de 1:15 y tiempo de 10 minutos.

Cuadro 27. Análisis de varianza para los valores de la remoción de materia orgánica.

Fuente de variación	SC	GL	CM	Fc	Signif.
Tiempo	3.10245	2	1.55123	0.14	0.87
Relación molar	42.6599	2	21.33	1.99	0.17
Interacción	7.86686	4	1.96671	0.18	0.94
Error experimental	193.418	18	10.7455		
Total	247.048	26			

El análisis de variancia me permite confirmar a un 95% de confianza que las medias del tiempo de retención no difieren entre sí, asimismo las relaciones molares muestran diferencia significativa entre las dosis aplicadas. Los factores tiempo de retención y relación molar no muestran interacción significativa para la remoción de materia orgánica en el lixiviado maduro.

#### 4.4. Caracterización bacteriana y fúngica en las muestras de mayor remoción de materia orgánica

Las muestras con mayor eficiencia de remoción con las diferentes relaciones molares, se obtuvo con los tiempos de 20 minutos.

Para la relación molar de 1:15 se obtuvo  $43 \times 10^3$  UFC/mL en enumeración de microorganismos viables, 0 en coliformes totales, 0 en coliformes termotolerantes, Ausencia en *Salmonella*, Presencia en *Staphylococcus aureus*, Ausencia en *Vibrión cholerae* y  $2 \times 10^3$  UFC/mL en numeración de Fungi.

Cuadro 28. Caracterización bacteriana y fúngica de la relación molar 1:15 a periodos de 20 minutos

PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS	UNIDADES	CANTIDAD
Enumeración de microorganismos aerobios viables	UFC/mL	$43 \times 10^3$
Coliformes totales	NMP/100mL	0
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	0
<i>Salmonella</i>	-	Ausencia
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	Presencia
<i>Vibrión cholerae</i>	-	Ausencia
Numeración de Fungi	UFC/mL	$2 \times 10^3$

Para la relación molar de 1:25 se obtuvo  $34 \times 10^3$  UFC/mL en enumeración de microorganismos viables, 0 en coliformes totales, 0 en coliformes termotolerantes, Ausencia en *Salmonella*, Presencia en *Staphylococcus aureus*, Presencia en *Vibrión cholerae* y  $3 \times 10^3$  UFC/mL en numeración de Fungi.

Cuadro 29. Caracterización bacteriana y fúngica de la relación molar 1:25 de 20 minutos.

Parámetros microbiológicos	Unidades	Cantidad
Enumeración de microorganismos aerobios viables	UFC/mL	$34 \times 10^3$
Coliformes totales	NMP/100mL	0
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	0
<i>Salmonella</i>	-	Ausencia
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	Presencia
<i>Vibrio cholerae</i>	-	Presencia
Numeración de Fungi	UFC/mL	$3 \times 10^3$

Para la relación molar de 1:35 se obtuvo  $46 \times 10^3$  UFC/mL en enumeración de microorganismos viables, 0 en coliformes totales, 0 en coliformes termotolerantes, Ausencia en *Salmonella*, Presencia en *Staphylococcus*, Presencia *Vibrión cholerae* y  $2 \times 10^3$  UFC/mL en numeración de Fungi.

Cuadro 30. Caracterización bacteriana y fúngica de la relación molar 1:35 a tiempo de 20 minutos.

Parámetros microbiológicos	Unidades	Cantidad
Enumeración de microorganismos aerobios viables	UFC/mL	$46 \times 10^3$
Coliformes totales	NMP/100mL	0
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	0
<i>Salmonella</i>	-	Ausencia
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	Presencia
<i>Vibrio cholerae</i>	-	Presencia
Numeración de Fungi	UFC/mL	$4 \times 10^3$

## V. DISCUSIÓN

Según CÁCERES (2002), la aplicabilidad de los procesos de oxidación avanzada como tratamiento para aguas contaminadas son idóneos cuando las concentraciones de DQO tienen valores de hasta 10 000 mgO<sub>2</sub>/L; para valores superiores es apropiado los tratamientos como la oxidación húmeda o la incineración. En el lote de lixiviado que se utilizó en esta investigación obtuvo valores de 2451.89 mgO<sub>2</sub>/L, 2737.30 mgO<sub>2</sub>/L y 2815.14 mgO<sub>2</sub>/L; los cuales se encuentran dentro del rango considerado por Cáceres. Para la caracterización de los parámetros, según BONEY y KATOCH (2016); la muestra utilizada es considerado un lixiviado viejo o estabilizado, así mismo la comparación de los parámetros con el Cuadro 2. (Caracterización fisicoquímica en lixiviado de diferentes rellenos sanitarios de México), confirma que se trata de un lixiviado maduro y no de un lixiviado joven como se podría pensar ya que la muestra fue recolectado del tanque de lixiviado que se encontraba operación, esto se debe a que el tanque en funcionamiento también recibe lixiviado estabilizado de las trincheras antiguas ya clausuradas.

Según DOS SANTOS (2009), la concentración óptima se encuentra entre 0.2 – 0.5 mM de Fe<sup>3+</sup>, valor obtenido de la relación molar con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a

usar. CÁCERES (2002), en su tesis doctoral describe que normalmente en la reacción Foto-Fenton se usa una concentración de 0.05mM de  $\text{Fe}^{2+}$  en forma de sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). De acuerdo con CERDA (2007) obtuvo los mejores tratamientos del lixiviado con una relación molar 1:25, equivalente a  $6.76 \times 10^{-3}$  M de Fe (II) y 0.1669 M de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Si bien es cierto cada uno de los autores revisados consiguieron una relación molar o dosis óptima diferente, se optó por seguir la metodología de CERDA (2007), debido a la equivalencia estequiométrica con la concentración de materia orgánica existente en el lixiviado a tratar, dato que se obtuvo con el índice de oxidabilidad al permanganato. El mejor tratamiento se obtuvo con la relación molar Fe:  $\text{H}_2\text{O}_2$  de 1:25 (0.007M Fe (III):0.17 M  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) equivalentes a 1780 ppm de Fe(III) y 5816 ppm de  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; resultado que se asemeja al obtenido por el citado autor.

Según CÁCERES (2002), CERDA (2007), PRIMO (2008), GARCÉS y RODRÍGUEZ (2009) y García (2007), citado por AZNATE *et al.* (2013); en el proceso Foto-Fenton la velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un  $\text{pH}=3$ . Sin embargo se ha observado que el  $\text{pH}$  varía constantemente durante el proceso. En la investigación de CERDA (2007), el  $\text{pH}$  inicial aumenta ligeramente pero se mantiene en el rango de 3 y por lo contrario en la investigación de PRIMO (2008), el  $\text{pH}$  inicial resultó con una ligera disminución reportando valores entre 2.2 y 2.8 para el  $\text{pH}$ . Para esta investigación los valores de  $\text{pH}$  tuvieron un comportamiento similar a los reportados por PRIMO (2008). El  $\text{pH}$  inicial de 3 disminuyó a valores en el

rango de 2.4 a 2.9. Estas variaciones de pH van a depender de las características del fluido, variando según las formaciones de compuestos ácidos o básicos en el proceso. Quiere decir que estos valores de pH están influenciados por la cantidad de reactivo que se utiliza en el proceso para cada tratamiento.

Según algunos autores como: BLANCO *et al* (2001), CÁCERES (2002), DOS SANTOS (2009), SIRTORI (2010); la temperatura no desempeña un papel importante en el proceso fotocatalítico, debido a que el proceso Foto-Fenton es fotónico a diferencia de los procesos térmicos. Para ZAPATA y COLS (2009), citado por SIRTORI, (2010), se ha demostrado que el proceso Foto-Fenton no mejora su eficacia con el incremento de temperatura a partir de unos 45°C. Según GARCÍA (2007), el aumento de temperatura supone, por lo general un aumento en la velocidad de las reacciones de oxidación, pero también detalla que en los procesos Fenton y Foto-Fenton los valores demasiado altos de temperatura, superiores a 40°C pueden descomponer el peróxido de hidrógeno perjudicando el proceso de degradación. Por su parte PRIMO (2008), probó temperaturas de 20°C y 45°C en el proceso Foto-Fenton y obtuvo que la eficacia final no se ve afectada por la temperatura. Sin embargo, se incrementa la cinética de reacción en los 5 primeros minutos. En esta investigación se realizó una prueba preliminar a temperaturas de 47°C, obteniendo una remoción de tan solo 15% de materia orgánica, comparada a una remoción de materia orgánica de 94% obtenida a temperatura de 34°C;



confirmando que el proceso Foto-Fenton no mejora la eficiencia de remoción a temperaturas mayores de 45°C.

Según Krutzler (1999), citado por CABRERA (2013), es lógico pensar que un aumento de concentración de contaminante implica un aumento del tiempo de tratamiento. Esta relación no es directamente proporcional, por tanto si el agua sufre importantes cambios en la concentración de contaminantes, el estado y el diseño del proceso necesitará nuevos datos. Según el análisis de varianza el tiempo de retención utilizado en el proceso tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la irradiancia acumulada con un 95% de nivel de confianza, debido a que a medida que el tiempo de exposición solar se incrementa se incrementa también la irradiancia acumulada. Sin embargo la eficiencia de remoción no muestran mejoras significativas a medida que el tiempo y la irradiancia a cumulada incrementan, según datos estadísticos los factores de tiempo de retención, relación molar y la interacción de estos tienen un efecto estadísticamente no significativo sobre la eficiencia de remoción con un 95 % de nivel de confianza. Quiere decir que estadísticamente los tratamientos evaluados en esta investigación son iguales entre sí. Se obtuvo el mayor porcentaje de remoción con el tiempo de 20 minutos de exposición solar, con 94.38% de remoción de materia orgánica. Este resultado es similar al obtenido por GARCÉS y RODRÍGUEZ (2009), en cuyo trabajo lograron un porcentaje de remoción del 79% a los 20 minutos de exposición solar, con un pH=3 y una relación molar de 1:20.

## VI. CONCLUSIONES

1. El lixiviado presentó valores fisicoquímicos característicos de un lixiviado viejo o estabilizado, se obtuvo un valor significativo de 2668 mg/l de materia orgánica, 8.12 de pH con presencia bacteriana y fúngica
2. Se evaluaron las relaciones molares de 1:15, 1:25 y 1:35 de Fe(III):H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la degradación del lixiviado en el proceso Foto-Fenton a tiempos de 10, 20 y 30 minutos. Obteniendo los mejores resultados para el periodo de exposición de 20 minutos.
3. La eficiencia de remoción alcanzada con el proceso Foto-Fenton en el lixiviado es de 94.38 % con una relación molar de 1:25, tiempo de 20 minutos y 3254.8 lx/m<sup>2</sup> de irradiancia solar acumulada.
4. Se determinó una reducción de 37 % en la enumeración de microorganismos viales, ausencia de coliformes totales, coliformes termotolerantes y salmonella, presencia de *Vibrio cholerae* y una reducción del 50 % en numeración de Fungi.

## VII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda aplicar el proceso Foto-Fenton por lotes de lixiviado, caracterizando inicialmente los parámetros físicos, químicos y microbiológicos.
2. Monitorear la generación de gases en el colector parabólico solar.
3. Caracterizar los gases generados en el proceso Foto-Fenton.
4. Realizar el análisis complementario de carbono orgánico total (TOC); como indicador de mineralización de los contaminantes con el proceso Foto-Fenton.
5. Determinar la factibilidad del uso de lixiviado como biol.
6. Cubrir los tanques de captación de lixiviado en el botadero municipal para reducir la cantidad del volumen generado de lixiviado.
7. Realizar un tratamiento complementario al proceso de oxidación avanzada, con el propósito de lograr un pH neutro.

## ABSTRACT

This research was developed with the purpose of reducing the organic charge present in the stabilized leaching from the San Ramon municipal dump through Foto-Fenton advanced oxidation. This study was done with a solar parabolic collector based on the equation  $X^2=20y$  with  $0.41 \text{ m}^2$  being the area of the solar collector and a 16 mm diameter borosilicate tube.

The Foto-Fenton process consisted of hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) as an oxidant, ferric chloride hexahydrate ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) as a catalyzer and solar radiation as the photonic source. A  $\text{pH}=3$  was established as the initial pH for the process, employing a two factor design with three levels (factorial  $3 \times 3$ ). With relation to the factor molar, doses of 1:15, 1:25 and 1:35 of  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$  were evaluated and for the factor of time of solar exposure, periods of 10, 20 and 30 minutes were evaluated.

For the results, an organic matter removal rate of 90.71%, 94.38% and 92.67% was obtained for the molar relation of 1:25 of  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$ . Likewise, a removal index of 85.60%, 89.21% and 88.04% for the molar relation of 1:15 of  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$ . On the other hand, for the molar relation of 1:35 of  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$ , a removal efficiency of 86.02%, 87.92% and 87.15% was found. It was observed that the molar relation 1:25 of  $\text{Fe}:\text{H}_2\text{O}_2$  with 20 minutes of solar exposure has the greatest removal efficiency for the organic matter; also reducing bacterial and fungal microorganisms, of which a 37% reduction in bacteria and a 50% reduction in the number of fungi was obtained.

**Keywords:** Leached, Advanced Oxidation, Photo-Fenton, Photocatalysis, Municipal Dump, Sanitary Fill, Parabolic Solar Collector.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCHIRAICO, C., VILCAHUAMAN, Q. 2010. Evaluación del tratamiento de lixiviado del relleno sanitario de Ancón, mediante procesos de coagulación – floculación y sedimentación. Tesis de Ingeniería. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 116 p.
- APHA-AWWA-WEF. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 Ed. American Public Health Association /AmericanWaterWorks Association/Water Environment Federation, Washington. 984 p.
- AZNATE, T., CERRO B., OROZCO, B. 2013. Degradación por fotocátalisis homogénea (Foto - Fenton) de efluentes líquidos contaminados con residuos de fenol. Tesis de Ingeniería. Colombia. Universidad de Cartagena de Indias. 87 p.
- BLANCO, G., MALATO, R., PERAL, J., SÁNCHEZ, S., CARDONA, A. 2001. Diseño de reactores para fotocátalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones. Ed. Miguel A. Blesa, La Plata-Argentina, ISBN 987-43-3809-1. 243-266 p.
- BONEY, A. DR. S.S. 2016. Study of Landfill Leachate Treatment Using Photo-Fenton Process – A Review. International Refereed Journal of

Engineering and Science (IRJES), NIT, Hamirpur, India. ISSN (Online) 2319-183X, (Print) 2319-1821 p.

CABRERA, R. 2013. Combinación de Fotocatálisis solar con Biorreactores de Membrana para el Tratamiento de Aguas Tóxicas. Modelado del proceso Foto – Fenton como Herramienta de Diseño y Optimización. Tesis Doctoral. Almería, España. Universidad de Almería. 294 p.

CÁCERES, V. 2002. Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar. Tesis Doctoral. Almería, España. Universidad de Almería. 368 p.

CERDA, S. 2007. Aplicación de Foto-Fenton a lixiviado de rellenos sanitarios, Tesis de Maestría, Jiutepec, Morelos, México. Universidad Autónoma de México, 128 p.

CENSOLAR – CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ENERGÍA SOLAR, 2013. Instalaciones de energía solar, Curso programado “Proyectista instalador de energía solar”, ISBN: 978-84-86505-38-7.

CHRISTOPHER, K.M., VAN, K.E., DEAN, R.A., SPENCER, A.C. Bioquímica. Martín Romo, Miguel. 4 Ed. Madrid, España, Pearson Educación S.A. 1343 p.

DÁVILA, A., GRANDA, P. 2013. Evaluación comparativa en una planta a escala piloto de lodos activados de aireación prolongada en el tratamiento de lixiviado de relleno sanitario municipal diluido con agua residual. Tesis para Ingeniería. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 203 p.

- DOS SANTOS, .2009. Tratamento terciário do lixiviado de um aterro de resíduos urbanos pelos processos Fenton e Foto-Fenton com radiação solar. Tesis de Maestría. Universidade do Porto. Porto, Portugal. 93 p.
- FARROKHI, M., DINDARLOO, K. JAMALI, A. 2015. Optimization of Fenton Oxidation Process for Biodegradability Enhancement of a Mature Landfill Leachate Using Response Surface Methodology. Research Journal of Environmental toxicology, Iran. 9 (6): 274-289.
- GARCÉS y RODRÍGUEZ, 2009, Evaluación de la fotodegradación sensibilizada con  $\text{TO}_2$  y  $\text{Fe}^{3+}$  para aguas coloreadas. Corporación universitaria Lasallista. Revista lasallista de investigación. Caldas, Antioquia, Colombia. 1: 54-59.
- GARCÍA, M. 2007. Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for comercial reactive azo dyes removal, Tesis de PhD, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, Barcelona, España. 262 p.
- MALATO, S., FERNÁNDEZ, P., MALDONADO, M., BLANCO, J. GERNJAK, W., 2009. Decontamination and didinfection of wáter by solar photocatalysis: Recent overview and trends. ELSEVIER., España. 147 (1):1 – 59.
- MENDEZ, N., CASTILLO, B., GARCÍA, R., SAURI R. 2010. Tratamiento de lixiviado por oxidación Fenton. Ingeniería e Investigación, Yucatán, México. 30(1).
- OEFA, 2014-2015. Fiscalización Ambiental en Residuos Sólidos de Gestión Municipal Provincial. Índice de cumplimiento de los municipios

- provinciales a nivel nacional. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú. 135 p.
- ORTA, T., ROJAS, N. YAÑEZ, I. MONGE, I., LONDOÑO, J. 2006. Alternativa de tratamiento de lixiviado de rellenos sanitarios en plantas de aguas residuales urbanas. AIDIS. México D.F. México. 1:16.
- PRIMO, M. 2008. Mejoras en el tratamiento de lixiviado de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Tesis Doctoral. Cantabria, España. Universidad de Cantabria. 41 p.
- QUICANO, T. 2014. Reducción de compuestos fenólicos en aguas residuales de baños portátiles con procesos de oxidación química avanzada ozono – Peróxido de hidrógeno. Tesis de Maestría. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 82 p.
- ROJAS, J. 2008. Potabilización de aguas superficiales mediante el proceso de ultrafiltración con membranas arrolladas en espiral. Tesis doctoral. Granada, España. Universidad de Granada. 271 p.
- SANCHEZ, L. 2007. Tratamientos combinados físico - químico y de oxidación para la depuración de aguas residuales en la industria corchera. Tesis Doctoral. Badajoz, España. Universidad de Extremadura. 708 p.
- SIRTORI, C. 2010. Evaluación analítica de procesos de transformación biológica, fotoquímica y fotocatalítica de fármacos en agua. Tesis Doctoral. España. Universidad de Almería. 304 p.
- VILAR, A. 2015. Evaluación del tratamiento integral del lixiviado de vertedero de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral. Coruña, Brasil. Universidade da Coruña. 228 p.



WU, Y., PASSANANTI, M., BRIGANTE, M., DONG, W., MAIHOT, G., 2014. Fe (III)-EDDS complex in Fenton and photo-Fenton processes: from the radical formation to the degradation of a target compound. NCBI. USA. 21, 21:12154 – 12162.

XIV CONFERENCIA ATEGRUS VERTEDEROS CONTROLADOS. (2013, LLEIDA, ESPAÑA). 2013. Lixiviados de vertederos: Complejo de residuos de difícil tratamiento. Wehrle Medioambiente. Lleida, España. [En línea]: (<https://www.youtube.com/watch?v=0vGgfILHEy4>, 14 nov. 2013).

## IX. ANEXOS

Cuadro 31. Cálculo de las Relaciones molares Fe: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Exp.	Ind. Oxd. Mn4	Equiv.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g/l)	Densidad DE H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Volumen	Vol/Peso PM=34.01	Mol/l	Relación Molar	FeCl <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O PM= 278	Cantidad de Fe (g/l)
1	2.45	2.13	5.21	0.51	10.21	0.30	0.15	15	0.010	2.65
2	2.74	2.13	5.82	0.51	11.40	0.34	0.17	15	0.011	2.96
3	2.82	2.13	5.98	0.51	11.73	0.34	0.18	15	0.012	3.05
4	2.45	2.13	5.21	0.51	10.21	0.30	0.15	25	0.006	1.59
5	2.74	2.13	5.82	0.51	11.40	0.34	0.17	25	0.007	1.78
6	2.82	2.13	5.98	0.51	11.73	0.34	0.18	25	0.007	1.83
7	2.45	2.13	5.21	0.51	10.21	0.30	0.15	35	0.004	1.14
8	2.74	2.13	5.82	0.51	11.40	0.34	0.17	35	0.005	1.27
9	2.82	2.13	5.98	0.51	11.73	0.34	0.18	35	0.005	1.31

Cuadro 32. Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:15

Nº	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	10:50	60	952	0.41	0.16	15088120.66	150.88	150.88
2	10:51	120	950	0.41	0.16	15056422.93	150.56	301.45
3	10:52	180	952	0.41	0.16	15088120.66	150.88	452.33
4	10:53	240	960	0.41	0.16	15214911.59	152.15	604.48

5	10:54	300	963	0.41	0.16	15262458.19	152.62	757.10
6	10:55	360	964	0.41	0.16	15278307.06	152.78	909.88
7	10:56	420	964	0.41	0.16	15278307.06	152.78	1062.67
8	10:57	480	966	0.41	0.16	15310004.79	153.10	1215.77
9	10:58	540	963	0.41	0.16	15262458.19	152.62	1368.39
10	10:59	600	962	0.41	0.16	15246609.32	152.47	1520.86

Cuadro 33. Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:15

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:02	60	1026	0.41	0.16	16260936.8	162.61	162.61
2	12:03	120	1042	0.41	0.16	16514518.6	165.15	327.75
3	12:04	180	1038	0.41	0.16	16451123.2	164.51	492.27
4	12:05	240	1037	0.41	0.16	16435274.3	164.35	656.62
5	12:06	300	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	819.07
6	12:07	360	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	981.20
7	12:08	420	1022	0.41	0.16	16197541.3	161.98	1143.18
8	12:09	480	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	1304.36
9	12:10	540	1015	0.41	0.16	16086599.2	160.87	1465.23
10	12:11	600	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	1626.73

Cuadro 34. Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:15

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:52	60	948	0.41	0.16	15024725.2	150.25	150.25
2	11:53	120	857	0.41	0.16	13582478.4	135.82	286.07
3	11:54	180	955	0.41	0.16	15135667.3	151.36	437.43
4	11:55	240	963	0.41	0.16	15262458.2	152.62	590.05
5	11:56	300	939	0.41	0.16	14882085.4	148.82	738.87
6	11:57	360	963	0.41	0.16	15262458.2	152.62	891.50
7	11:58	420	950	0.41	0.16	15056422.9	150.56	1042.06
8	11:59	480	948	0.41	0.16	15024725.2	150.25	1192.31
9	12:00	540	880	0.41	0.16	13947002.3	139.47	1331.78
10	12:01	600	846	0.41	0.16	13408140.8	134.08	1465.86

Cuadro 35. Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:15

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:03	60	962	0.41	0.16	15246609.3	152.47	152.47
2	11:04	120	981	0.41	0.16	15547737.8	155.48	307.94
3	11:05	180	987	0.41	0.16	15642831	156.43	464.37
4	11:06	240	988	0.41	0.16	15658679.8	156.59	620.96
5	11:07	300	988	0.41	0.16	15658679.8	156.59	777.55

6	11:08	360	989	0.41	0.16	15674528.7	156.75	934.29
7	11:09	420	992	0.41	0.16	15722075.3	157.22	1091.51
8	11:10	480	993	0.41	0.16	15737924.2	157.38	1248.89
9	11:11	540	1001	0.41	0.16	15864715.1	158.65	1407.54
10	11:12	600	1003	0.41	0.16	15896412.8	158.96	1566.50
11	11:13	660	1001	0.41	0.16	15864715.1	158.65	1725.15
12	11:14	720	1000	0.41	0.16	15848866.2	158.49	1883.64
13	11:15	780	1000	0.41	0.16	15848866.2	158.49	2042.13
14	11:16	840	1002	0.41	0.16	15880564	158.81	2200.93
15	11:17	900	1004	0.41	0.16	15912261.7	159.12	2360.05
16	11:18	960	1008	0.41	0.16	15975657.2	159.76	2519.81
17	11:19	1020	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	2679.73
18	11:20	1080	1008	0.41	0.16	15975657.2	159.76	2839.48
19	11:21	1140	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	2999.40
20	11:22	1200	1011	0.41	0.16	16023203.8	160.23	3159.63

Cuadro 36. Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:15

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:15	60	1014	0.41	0.16	16070750.4	160.71	160.71
2	12:16	120	1014	0.41	0.16	16070750.4	160.71	321.42
3	12:17	180	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	482.60
4	12:18	240	1018	0.41	0.16	16134145.8	161.34	643.94
5	12:19	300	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	805.44

6	12:20	360	1016	0.41	0.16	16102448.1	161.02	966.46
7	12:21	420	1018	0.41	0.16	16134145.8	161.34	1127.81
8	12:22	480	1016	0.41	0.16	16102448.1	161.02	1288.83
9	12:23	540	1014	0.41	0.16	16070750.4	160.71	1449.54
10	12:24	600	1014	0.41	0.16	16070750.4	160.71	1610.24
11	12:25	660	1012	0.41	0.16	16039052.6	160.39	1770.64
12	12:26	720	1013	0.41	0.16	16054901.5	160.55	1931.18
13	12:27	780	1014	0.41	0.16	16070750.4	160.71	2091.89
14	12:28	840	1020	0.41	0.16	16165843.6	161.66	2253.55
15	12:29	900	1029	0.41	0.16	16308483.4	163.08	2416.64
16	12:30	960	1020	0.41	0.16	16165843.6	161.66	2578.29
17	12:31	1020	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	2739.79
18	12:32	1080	1016	0.41	0.16	16102448.1	161.02	2900.82
19	12:33	1140	1013	0.41	0.16	16054901.5	160.55	3061.37
20	12:34	1200	1013	0.41	0.16	16054901.5	160.55	3221.92

Cuadro 37. Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:15

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:09	60	930	0.41	0.16	14739445.6	147.39	147.39
2	12:10	120	953	0.41	0.16	15103969.5	151.04	298.43
3	12:11	180	955	0.41	0.16	15135667.3	151.36	449.79
4	12:12	240	961	0.41	0.16	15230760.5	152.31	602.10
5	12:13	300	952	0.41	0.16	15088120.7	150.88	752.98

6	12:14	360	952	0.41	0.16	15088120.7	150.88	903.86
7	12:15	420	936	0.41	0.16	14834538.8	148.35	1052.21
8	12:16	480	961	0.41	0.16	15230760.5	152.31	1204.51
9	12:17	540	965	0.41	0.16	15294155.9	152.94	1357.46
10	12:18	600	969	0.41	0.16	15357551.4	153.58	1511.03
11	12:19	660	960	0.41	0.16	15214911.6	152.15	1663.18
12	12:20	720	954	0.41	0.16	15119818.4	151.20	1814.38
13	12:21	780	963	0.41	0.16	15262458.2	152.62	1967.00
14	12:22	840	937	0.41	0.16	14850387.7	148.50	2115.51
15	12:23	900	959	0.41	0.16	15199062.7	151.99	2267.50
16	12:24	960	880	0.41	0.16	13947002.3	139.47	2406.97
17	12:25	1020	871	0.41	0.16	13804362.5	138.04	2545.01
18	12:26	1080	860	0.41	0.16	13630025	136.30	2681.31
19	12:27	1140	863	0.41	0.16	13677571.6	136.78	2818.09
20	12:28	1200	826	0.41	0.16	13091163.5	130.91	2949.00

Cuadro 38. Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:15

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:29	60	1014	0.41	0.16	16070750.4	160.71	160.71
2	11:30	120	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	320.62
3	11:31	180	999	0.41	0.16	15833017.4	158.33	478.95
4	11:32	240	992	0.41	0.16	15722075.3	157.22	636.17
5	11:33	300	997	0.41	0.16	15801319.6	158.01	794.19

6	11:34	360	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	955.69
7	11:35	420	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	1117.19
8	11:36	480	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	1279.32
9	11:37	540	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	1441.45
10	11:38	600	1010	0.41	0.16	16007354.9	160.07	1601.53
11	11:39	660	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	1762.71
12	11:40	720	1020	0.41	0.16	16165843.6	161.66	1924.37
13	11:41	780	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	2086.50
14	11:42	840	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	2249.91
15	11:43	900	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	2414.73
16	11:44	960	1038	0.41	0.16	16451123.2	164.51	2579.24
17	11:45	1020	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	2744.07
18	11:46	1080	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	2908.90
19	11:47	1140	1046	0.41	0.16	16577914.1	165.78	3074.68
20	11:48	1200	1053	0.41	0.16	16688856.2	166.89	3241.57
21	11:49	1260	1051	0.41	0.16	16657158.4	166.57	3408.14
22	11:50	1320	1054	0.41	0.16	16704705	167.05	3575.19
23	11:51	1380	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	3738.59
24	11:52	1440	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	3900.88
25	11:53	1500	1027	0.41	0.16	16276785.6	162.77	4063.65
26	11:54	1560	1020	0.41	0.16	16165843.6	161.66	4225.31
27	11:55	1620	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	4387.44
28	11:56	1680	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	4548.62
29	11:57	1740	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	4710.12
30	11:58	1800	1020	0.41	0.16	16165843.6	161.66	4871.78

---



Cuadro 39. Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:15

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:36	60	1011	0.41	0.16	16023203.8	160.23	160.23
2	12:37	120	1012	0.41	0.16	16039052.6	160.39	320.62
3	12:38	180	1003	0.41	0.16	15896412.8	158.96	479.59
4	12:39	240	989	0.41	0.16	15674528.7	156.75	636.33
5	12:40	300	993	0.41	0.16	15737924.2	157.38	793.71
6	12:41	360	1047	0.41	0.16	16593763	165.94	959.65
7	12:42	420	1046	0.41	0.16	16577914.1	165.78	1125.43
8	12:43	480	1047	0.41	0.16	16593763	165.94	1291.37
9	12:44	540	1052	0.41	0.16	16673007.3	166.73	1458.10
10	12:45	600	1010	0.41	0.16	16007354.9	160.07	1618.17
11	12:46	660	1001	0.41	0.16	15864715.1	158.65	1776.82
12	12:47	720	1002	0.41	0.16	15880564	158.81	1935.62
13	12:48	780	1000	0.41	0.16	15848866.2	158.49	2094.11
14	12:49	840	1004	0.41	0.16	15912261.7	159.12	2253.23
15	12:50	900	1008	0.41	0.16	15975657.2	159.76	2412.99
16	12:51	960	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	2574.49
17	12:52	1020	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	2736.62
18	12:53	1080	1015	0.41	0.16	16086599.2	160.87	2897.49
19	12:54	1140	1018	0.41	0.16	16134145.8	161.34	3058.83
20	12:55	1200	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	3221.28
21	12:56	1260	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	3382.78
22	12:57	1320	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	3544.28
23	12:58	1380	1018	0.41	0.16	16134145.8	161.34	3705.62

24	12:59	1440	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	3866.81
25	13:00	1500	1008	0.41	0.16	15975657.2	159.76	4026.56
26	13:01	1560	1007	0.41	0.16	15959808.3	159.60	4186.16
27	13:02	1620	998	0.41	0.16	15817168.5	158.17	4344.33
28	13:03	1680	1003	0.41	0.16	15896412.8	158.96	4503.30
29	13:04	1740	1004	0.41	0.16	15912261.7	159.12	4662.42
30	13:05	1800	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	4822.33

Cuadro 40. Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:15

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:39	60	955	0.41	0.16	15135667.3	151.36	151.36
2	12:40	120	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	314.76
3	12:41	180	1032	0.41	0.16	16356030	163.56	478.32
4	12:42	240	1035	0.41	0.16	16403576.6	164.04	642.35
5	12:43	300	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	807.18
6	12:44	360	1012	0.41	0.16	16039052.6	160.39	967.57
7	12:45	420	1015	0.41	0.16	16086599.2	160.87	1128.44
8	12:46	480	1043	0.41	0.16	16530367.5	165.30	1293.74
9	12:47	540	1048	0.41	0.16	16609611.8	166.10	1459.84
10	12:48	600	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	1624.67
11	12:49	660	1043	0.41	0.16	16530367.5	165.30	1789.97
12	12:50	720	1052	0.41	0.16	16673007.3	166.73	1956.70
13	12:51	780	1058	0.41	0.16	16768100.5	167.68	2124.38

14	12:52	840	1038	0.41	0.16	16451123.2	164.51	2288.89
15	12:53	900	1046	0.41	0.16	16577914.1	165.78	2454.67
16	12:54	960	1047	0.41	0.16	16593763	165.94	2620.61
17	12:55	1020	1053	0.41	0.16	16688856.2	166.89	2787.50
18	12:56	1080	1050	0.41	0.16	16641309.6	166.41	2953.91
19	12:57	1140	1057	0.41	0.16	16752251.6	167.52	3121.43
20	12:58	1200	1054	0.41	0.16	16704705	167.05	3288.48
21	12:59	1260	1052	0.41	0.16	16673007.3	166.73	3455.21
22	13:00	1320	1053	0.41	0.16	16688856.2	166.89	3622.10
23	13:01	1380	1056	0.41	0.16	16736402.8	167.36	3789.46
24	13:02	1440	1054	0.41	0.16	16704705	167.05	3956.51
25	13:03	1500	1058	0.41	0.16	16768100.5	167.68	4124.19
26	13:04	1560	1064	0.41	0.16	16863193.7	168.63	4292.82
27	13:05	1620	1069	0.41	0.16	16942438	169.42	4462.25
28	13:06	1680	1081	0.41	0.16	17132624.4	171.33	4633.57
29	13:07	1740	1099	0.41	0.16	17417904	174.18	4807.75
30	13:08	1800	940	0.41	0.16	14897934.3	148.98	4956.73

Cuadro 41. Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:25

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:07	60	980	0.41	0.16	15531888.92	155.32	155.32
2	11:08	120	979	0.41	0.16	15516040.05	155.16	310.48
3	11:09	180	980	0.41	0.16	15531888.92	155.32	465.80
4	11:10	240	984	0.41	0.16	15595284.38	155.95	621.75

5	11:11	300	983	0.41	0.16	15579435.52	155.79	777.55
6	11:12	360	985	0.41	0.16	15611133.25	156.11	933.66
7	11:13	420	990	0.41	0.16	15690377.58	156.90	1090.56
8	11:14	480	991	0.41	0.16	15706226.45	157.06	1247.62
9	11:15	540	990	0.41	0.16	15690377.58	156.90	1404.53
10	11:16	600	993	0.41	0.16	15737924.18	157.38	1561.91

Cuadro 42. Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:25

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:23	60	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	162.13
2	12:24	120	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	324.58
3	12:25	180	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	486.72
4	12:26	240	1022	0.41	0.16	16197541.3	161.98	648.69
5	12:27	300	997	0.41	0.16	15801319.6	158.01	806.71
6	12:28	360	994	0.41	0.16	15753773	157.54	964.25
7	12:29	420	1000	0.41	0.16	15848866.2	158.49	1122.73
8	12:30	480	1001	0.41	0.16	15864715.1	158.65	1281.38
9	12:31	540	1003	0.41	0.16	15896412.8	158.96	1440.34
10	12:32	600	988	0.41	0.16	15658679.8	156.59	1596.93

Cuadro 43. Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:25

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:11	60	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	163.24
2	11:12	120	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	326.17
3	11:13	180	1032	0.41	0.16	16356030	163.56	489.73
4	11:14	240	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	653.13
5	11:15	300	1033	0.41	0.16	16371878.8	163.72	816.85
6	11:16	360	1039	0.41	0.16	16466972	164.67	981.52
7	11:17	420	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	1146.51
8	11:18	480	1042	0.41	0.16	16514518.6	165.15	1311.65
9	11:19	540	1044	0.41	0.16	16546216.4	165.46	1477.11
10	11:20	600	1043	0.41	0.16	16530367.5	165.30	1642.42

Cuadro 44. Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:25

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:19	60	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	159.92
2	11:20	120	1010	0.41	0.16	16007355	160.07	319.99
3	11:21	180	1008	0.41	0.16	15975657	159.76	479.75
4	11:22	240	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	639.66
5	11:23	300	1013	0.41	0.16	16054902	160.55	800.21
6	11:24	360	1013	0.41	0.16	16054902	160.55	960.76

7	11:25	420	1010	0.41	0.16	16007355	160.07	1120.83
8	11:26	480	1012	0.41	0.16	16039053	160.39	1281.22
9	11:27	540	1012	0.41	0.16	16039053	160.39	1441.61
10	11:28	600	1015	0.41	0.16	16086599	160.87	1602.48
11	11:29	660	1018	0.41	0.16	16134146	161.34	1763.82
12	11:30	720	1020	0.41	0.16	16165844	161.66	1925.48
13	11:31	780	1022	0.41	0.16	16197541	161.98	2087.45
14	11:32	840	1019	0.41	0.16	16149995	161.50	2248.95
15	11:33	900	1023	0.41	0.16	16213390	162.13	2411.09
16	11:34	960	1026	0.41	0.16	16260937	162.61	2573.70
17	11:35	1020	1026	0.41	0.16	16260937	162.61	2736.31
18	11:36	1080	1027	0.41	0.16	16276786	162.77	2899.07
19	11:37	1140	1027	0.41	0.16	16276786	162.77	3061.84
20	11:38	1200	1025	0.41	0.16	16245088	162.45	3224.29

Cuadro 45. Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:25

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:32	60	987	0.41	0.16	15642831	156.43	156.43
2	12:33	120	984	0.41	0.16	15595284.4	155.95	312.38
3	12:34	180	981	0.41	0.16	15547737.8	155.48	467.86
4	12:35	240	975	0.41	0.16	15452644.6	154.53	622.38
5	12:36	300	978	0.41	0.16	15500191.2	155.00	777.39
6	12:37	360	971	0.41	0.16	15389249.1	153.89	931.28
7	12:38	420	979	0.41	0.16	15516040.1	155.16	1086.44

8	12:39	480	984	0.41	0.16	15595284.4	155.95	1242.39
9	12:40	540	987	0.41	0.16	15642831	156.43	1398.82
10	12:41	600	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	1560.00
11	12:42	660	1022	0.41	0.16	16197541.3	161.98	1721.98
12	12:43	720	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	1884.27
13	12:44	780	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	2045.45
14	12:45	840	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	2206.64
15	12:46	900	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	2367.82
16	12:47	960	1037	0.41	0.16	16435274.3	164.35	2532.17
17	12:48	1020	1027	0.41	0.16	16276785.6	162.77	2694.94
18	12:49	1080	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	2856.12
19	12:50	1140	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	3017.62
20	12:51	1200	1004	0.41	0.16	15912261.7	159.12	3176.75

Cuadro 46. Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:25

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:28	60	1060	0.41	0.16	16799798.2	168.00	168.00
2	12:29	120	1058	0.41	0.16	16768100.5	167.68	335.68
3	12:30	180	1059	0.41	0.16	16783949.4	167.84	503.52
4	12:31	240	1060	0.41	0.16	16799798.2	168.00	671.52
5	12:32	300	1060	0.41	0.16	16799798.2	168.00	839.51
6	12:33	360	1058	0.41	0.16	16768100.5	167.68	1007.20
7	12:34	420	1059	0.41	0.16	16783949.4	167.84	1175.03
8	12:35	480	1061	0.41	0.16	16815647.1	168.16	1343.19

9	12:36	540	1062	0.41	0.16	16831495.9	168.31	1511.51
10	12:37	600	1068	0.41	0.16	16926589.1	169.27	1680.77
11	12:38	660	1068	0.41	0.16	16926589.1	169.27	1850.04
12	12:39	720	1066	0.41	0.16	16894891.4	168.95	2018.99
13	12:40	780	1057	0.41	0.16	16752251.6	167.52	2186.51
14	12:41	840	1052	0.41	0.16	16673007.3	166.73	2353.24
15	12:42	900	1063	0.41	0.16	16847344.8	168.47	2521.71
16	12:43	960	1064	0.41	0.16	16863193.7	168.63	2690.35
17	12:44	1020	1065	0.41	0.16	16879042.5	168.79	2859.14
18	12:45	1080	1060	0.41	0.16	16799798.2	168.00	3027.13
19	12:46	1140	1061	0.41	0.16	16815647.1	168.16	3195.29
20	12:47	1200	1061	0.41	0.16	16815647.1	168.16	3363.45

Cuadro 47. Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:25

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:50	60	1037	0.41	0.16	16435274.3	164.35	164.35
2	11:51	120	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	326.49
3	11:52	180	1029	0.41	0.16	16308483.4	163.08	489.57
4	11:53	240	1032	0.41	0.16	16356030	163.56	653.13
5	11:54	300	1037	0.41	0.16	16435274.3	164.35	817.48
6	11:55	360	1015	0.41	0.16	16086599.2	160.87	978.35
7	11:56	420	1013	0.41	0.16	16054901.5	160.55	1138.90
8	11:57	480	1010	0.41	0.16	16007354.9	160.07	1298.97



9	11:58	540	1013	0.41	0.16	16054901.5	160.55	1459.52
10	11:59	600	1015	0.41	0.16	16086599.2	160.87	1620.39
11	12:00	660	1020	0.41	0.16	16165843.6	161.66	1782.05
12	12:01	720	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	1945.29
13	12:02	780	1035	0.41	0.16	16403576.6	164.04	2109.33
14	12:03	840	1034	0.41	0.16	16387727.7	163.88	2273.20
15	12:04	900	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	2436.60
16	12:05	960	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	2599.53
17	12:06	1020	1026	0.41	0.16	16260936.8	162.61	2762.14
18	12:07	1080	1015	0.41	0.16	16086599.2	160.87	2923.01
19	12:08	1140	1020	0.41	0.16	16165843.6	161.66	3084.66
20	12:09	1200	1026	0.41	0.16	16260936.8	162.61	3247.27
21	12:10	1260	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	3410.52
22	12:11	1320	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	3573.76
23	12:12	1380	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	3736.69
24	12:13	1440	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	3898.19
25	12:14	1500	1020	0.41	0.16	16165843.6	161.66	4059.85
26	12:15	1560	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	4222.14
27	12:16	1620	1021	0.41	0.16	16181692.4	161.82	4383.95
28	12:17	1680	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	4547.36
29	12:18	1740	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	4710.60
30	12:19	1800	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	4872.73

---

Cuadro 48. Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:25

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:50	60	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	162.13
2	11:51	120	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	324.27
3	11:52	180	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	486.40
4	11:53	240	1021	0.41	0.16	16181692.4	161.82	648.22
5	11:54	300	1015	0.41	0.16	16086599.2	160.87	809.08
6	11:55	360	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	970.27
7	11:56	420	1022	0.41	0.16	16197541.3	161.98	1132.24
8	11:57	480	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	1293.74
9	11:58	540	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	1453.66
10	11:59	600	1006	0.41	0.16	15943959.4	159.44	1613.10
11	12:00	660	998	0.41	0.16	15817168.5	158.17	1771.27
12	12:01	720	993	0.41	0.16	15737924.2	157.38	1928.65
13	12:02	780	998	0.41	0.16	15817168.5	158.17	2086.82
14	12:03	840	998	0.41	0.16	15817168.5	158.17	2244.99
15	12:04	900	1018	0.41	0.16	16134145.8	161.34	2406.33
16	12:05	960	1045	0.41	0.16	16562065.2	165.62	2571.95
17	12:06	1020	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	2736.94
18	12:07	1080	1045	0.41	0.16	16562065.2	165.62	2902.56
19	12:08	1140	1042	0.41	0.16	16514518.6	165.15	3067.71
20	12:09	1200	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	3232.69
21	12:10	1260	1043	0.41	0.16	16530367.5	165.30	3398.00
22	12:11	1320	1056	0.41	0.16	16736402.8	167.36	3565.36
23	12:12	1380	1056	0.41	0.16	16736402.8	167.36	3732.72

24	12:13	1440	1054	0.41	0.16	16704705	167.05	3899.77
25	12:14	1500	1057	0.41	0.16	16752251.6	167.52	4067.29
26	12:15	1560	1059	0.41	0.16	16783949.4	167.84	4235.13
27	12:16	1620	1059	0.41	0.16	16783949.4	167.84	4402.97
28	12:17	1680	1059	0.41	0.16	16783949.4	167.84	4570.81
29	12:18	1740	1058	0.41	0.16	16768100.5	167.68	4738.49
30	12:19	1800	1056	0.41	0.16	16736402.8	167.36	4905.86

Cuadro 49. Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:25

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:50	60	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	162.29
2	11:51	120	1026	0.41	0.16	16260936.8	162.61	324.90
3	11:52	180	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	488.30
4	11:53	240	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	651.55
5	11:54	300	1029	0.41	0.16	16308483.4	163.08	814.63
6	11:55	360	1026	0.41	0.16	16260936.8	162.61	977.24
7	11:56	420	1008	0.41	0.16	15975657.2	159.76	1137.00
8	11:57	480	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	1299.29
9	11:58	540	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	1462.22
10	11:59	600	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	1625.14
11	12:00	660	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	1788.54
12	12:01	720	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	1951.79
13	12:02	780	1035	0.41	0.16	16403576.6	164.04	2115.82
14	12:03	840	1048	0.41	0.16	16609611.8	166.10	2281.92

15	12:04	900	1039	0.41	0.16	16466972	164.67	2446.59
16	12:05	960	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	2609.99
17	12:06	1020	1007	0.41	0.16	15959808.3	159.60	2769.59
18	12:07	1080	999	0.41	0.16	15833017.4	158.33	2927.92
19	12:08	1140	996	0.41	0.16	15785470.8	157.85	3085.77
20	12:09	1200	998	0.41	0.16	15817168.5	158.17	3243.95
21	12:10	1260	1008	0.41	0.16	15975657.2	159.76	3403.70
22	12:11	1320	1006	0.41	0.16	15943959.4	159.44	3563.14
23	12:12	1380	1001	0.41	0.16	15864715.1	158.65	3721.79
24	12:13	1440	994	0.41	0.16	15753773	157.54	3879.33
25	12:14	1500	987	0.41	0.16	15642831	156.43	4035.76
26	12:15	1560	986	0.41	0.16	15626982.1	156.27	4192.03
27	12:16	1620	989	0.41	0.16	15674528.7	156.75	4348.77
28	12:17	1680	994	0.41	0.16	15753773	157.54	4506.31
29	12:18	1740	988	0.41	0.16	15658679.8	156.59	4662.89
30	12:19	1800	990	0.41	0.16	15690377.6	156.90	4819.80

Cuadro 50. Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:35

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:08	60	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	162.93
2	12:09	120	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	325.38
3	12:10	180	1026	0.41	0.16	16260936.8	162.61	487.99
4	12:11	240	1029	0.41	0.16	16308483.4	163.08	651.07
5	12:12	300	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	813.52

6	12:13	360	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	975.97
7	12:14	420	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	1138.90
8	12:15	480	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	1301.83
9	12:16	540	1029	0.41	0.16	16308483.4	163.08	1464.91
10	12:17	600	1032	0.41	0.16	16356030	163.56	1628.47

Cuadro 51. Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:35

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	13:25	60	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	159.92
2	13:26	120	1008	0.41	0.16	15975657.2	159.76	319.67
3	13:27	180	1007	0.41	0.16	15959808.3	159.60	479.27
4	13:28	240	1004	0.41	0.16	15912261.7	159.12	638.39
5	13:29	300	1005	0.41	0.16	15928110.6	159.28	797.67
6	13:30	360	1002	0.41	0.16	15880564	158.81	956.48
7	13:31	420	1007	0.41	0.16	15959808.3	159.60	1116.08
8	13:32	480	1008	0.41	0.16	15975657.2	159.76	1275.83
9	13:33	540	1008	0.41	0.16	15975657.2	159.76	1435.59
10	13:34	600	1005	0.41	0.16	15928110.6	159.28	1594.87

Cuadro 52. Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 10 minutos - 1:35

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:16	60	989	0.41	0.16	15674528.7	156.75	156.75
2	12:17	120	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	321.73
3	12:18	180	1042	0.41	0.16	16514518.6	165.15	486.88
4	12:19	240	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	651.71
5	12:20	300	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	816.69
6	12:21	360	1042	0.41	0.16	16514518.6	165.15	981.84
7	12:22	420	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	1146.82
8	12:23	480	1049	0.41	0.16	16625460.7	166.25	1313.08
9	12:24	540	1057	0.41	0.16	16752251.6	167.52	1480.60
10	12:25	600	1050	0.41	0.16	16641309.6	166.41	1647.01

Cuadro 53. Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:35

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	13:04	60	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	162.29
2	13:05	120	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	324.43
3	13:06	180	1026	0.41	0.16	16260936.8	162.61	487.04
4	13:07	240	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	649.96
5	13:08	300	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	812.89
6	13:09	360	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	975.02

7	13:10	420	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	1137.95
8	13:11	480	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	1301.19
9	13:12	540	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	1464.59
10	13:13	600	1036	0.41	0.16	16419425.4	164.19	1628.79
11	13:14	660	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	1792.19
12	13:15	720	1035	0.41	0.16	16403576.6	164.04	1956.23
13	13:16	780	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	2119.47
14	13:17	840	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	2282.87
15	13:18	900	1022	0.41	0.16	16197541.3	161.98	2444.85
16	13:19	960	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	2607.14
17	13:20	1020	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	2769.59
18	13:21	1080	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	2932.04
19	13:22	1140	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	3091.96
20	13:23	1200	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	3251.87

Cuadro 54. Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:35

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	13:36	60	1023	0.41	0.16	16213390.2	162.13	162.13
2	13:37	120	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	324.58
3	13:38	180	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	487.04
4	13:39	240	1025	0.41	0.16	16245087.9	162.45	649.49
5	13:40	300	1027	0.41	0.16	16276785.6	162.77	812.25
6	13:41	360	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	975.50
7	13:42	420	1036	0.41	0.16	16419425.4	164.19	1139.69

8	13:43	480	1034	0.41	0.16	16387727.7	163.88	1303.57
9	13:44	540	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	1468.40
10	13:45	600	1039	0.41	0.16	16466972	164.67	1633.07
11	13:46	660	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	1796.31
12	13:47	720	1034	0.41	0.16	16387727.7	163.88	1960.19
13	13:48	780	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	2125.17
14	13:49	840	1035	0.41	0.16	16403576.6	164.04	2289.21
15	13:50	900	1035	0.41	0.16	16403576.6	164.04	2453.25
16	13:51	960	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	2618.07
17	13:52	1020	1037	0.41	0.16	16435274.3	164.35	2782.43
18	13:53	1080	1033	0.41	0.16	16371878.8	163.72	2946.15
19	13:54	1140	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	3109.55
20	13:55	1200	1033	0.41	0.16	16371878.8	163.72	3273.27

Cuadro 55. Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 20 minutos - 1:35

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	11:22	60	1037	0.41	0.16	16435274.3	164.35	164.35
2	11:23	120	1039	0.41	0.16	16466972	164.67	329.02
3	11:24	180	1038	0.41	0.16	16451123.2	164.51	493.53
4	11:25	240	1039	0.41	0.16	16466972	164.67	658.20
5	11:26	300	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	823.19
6	11:27	360	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	988.02
7	11:28	420	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	1153.01
8	11:29	480	1043	0.41	0.16	16530367.5	165.30	1318.31



9	11:30	540	1036	0.41	0.16	16419425.4	164.19	1482.50
10	11:31	600	1033	0.41	0.16	16371878.8	163.72	1646.22
11	11:32	660	1041	0.41	0.16	16498669.8	164.99	1811.21
12	11:33	720	1039	0.41	0.16	16466972	164.67	1975.88
13	11:34	780	1039	0.41	0.16	16466972	164.67	2140.55
14	11:35	840	1040	0.41	0.16	16482820.9	164.83	2305.38
15	11:36	900	1042	0.41	0.16	16514518.6	165.15	2470.52
16	11:37	960	1043	0.41	0.16	16530367.5	165.30	2635.82
17	11:38	1020	1046	0.41	0.16	16577914.1	165.78	2801.60
18	11:39	1080	1048	0.41	0.16	16609611.8	166.10	2967.70
19	11:40	1140	1046	0.41	0.16	16577914.1	165.78	3133.48
20	11:41	1200	1048	0.41	0.16	16609611.8	166.10	3299.58

Cuadro 56. Repetición 1. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:35

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:33	60	1022	0.41	0.16	16197541.3	161.98	161.98
2	12:34	120	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	324.27
3	12:35	180	1026	0.41	0.16	16260936.8	162.61	486.88
4	12:36	240	1028	0.41	0.16	16292634.5	162.93	649.80
5	12:37	300	1029	0.41	0.16	16308483.4	163.08	812.89
6	12:38	360	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	976.13
7	12:39	420	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	1139.37
8	12:40	480	1031	0.41	0.16	16340181.1	163.40	1302.78
9	12:41	540	1033	0.41	0.16	16371878.8	163.72	1466.50

10	12:42	600	1035	0.41	0.16	16403576.6	164.04	1630.53
11	12:43	660	1036	0.41	0.16	16419425.4	164.19	1794.73
12	12:44	720	1036	0.41	0.16	16419425.4	164.19	1958.92
13	12:45	780	1035	0.41	0.16	16403576.6	164.04	2122.96
14	12:46	840	1032	0.41	0.16	16356030	163.56	2286.52
15	12:47	900	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	2449.76
16	12:48	960	1034	0.41	0.16	16387727.7	163.88	2613.64
17	12:49	1020	1032	0.41	0.16	16356030	163.56	2777.20
18	12:50	1080	1030	0.41	0.16	16324332.2	163.24	2940.44
19	12:51	1140	1032	0.41	0.16	16356030	163.56	3104.00
20	12:52	1200	1032	0.41	0.16	16356030	163.56	3267.56
21	12:53	1260	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	3429.85
22	12:54	1320	1011	0.41	0.16	16023203.8	160.23	3590.09
23	12:55	1380	1013	0.41	0.16	16054901.5	160.55	3750.63
24	12:56	1440	1034	0.41	0.16	16387727.7	163.88	3914.51
25	12:57	1500	1044	0.41	0.16	16546216.4	165.46	4079.97
26	12:58	1560	1048	0.41	0.16	16609611.8	166.10	4246.07
27	12:59	1620	1050	0.41	0.16	16641309.6	166.41	4412.48
28	13:00	1680	1043	0.41	0.16	16530367.5	165.30	4577.79
29	13:01	1740	1038	0.41	0.16	16451123.2	164.51	4742.30
30	13:02	1800	1038	0.41	0.16	16451123.2	164.51	4906.81

---

Cuadro 55. Repetición 2. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:35

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	13:26	60	1022	0.41	0.16	16197541.3	161.98	161.98
2	13:27	120	1021	0.41	0.16	16181692.4	161.82	323.79
3	13:28	180	1020	0.41	0.16	16165843.6	161.66	485.45
4	13:29	240	1019	0.41	0.16	16149994.7	161.50	646.95
5	13:30	300	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	809.24
6	13:31	360	1024	0.41	0.16	16229239	162.29	971.54
7	13:32	420	1026	0.41	0.16	16260936.8	162.61	1134.14
8	13:33	480	1018	0.41	0.16	16134145.8	161.34	1295.49
9	13:34	540	1017	0.41	0.16	16118297	161.18	1456.67
10	13:35	600	1018	0.41	0.16	16134145.8	161.34	1618.01
11	13:36	660	1006	0.41	0.16	15943959.4	159.44	1777.45
12	13:37	720	996	0.41	0.16	15785470.8	157.85	1935.31
13	13:38	780	1000	0.41	0.16	15848866.2	158.49	2093.79
14	13:39	840	1004	0.41	0.16	15912261.7	159.12	2252.92
15	13:40	900	1005	0.41	0.16	15928110.6	159.28	2412.20
16	13:41	960	1006	0.41	0.16	15943959.4	159.44	2571.64
17	13:42	1020	1006	0.41	0.16	15943959.4	159.44	2731.08
18	13:43	1080	1006	0.41	0.16	15943959.4	159.44	2890.52
19	13:44	1140	1011	0.41	0.16	16023203.8	160.23	3050.75
20	13:45	1200	1010	0.41	0.16	16007354.9	160.07	3210.82
21	13:46	1260	1009	0.41	0.16	15991506	159.92	3370.74
22	13:47	1320	998	0.41	0.16	15817168.5	158.17	3528.91
23	13:48	1380	995	0.41	0.16	15769621.9	157.70	3686.60

24	13:49	1440	972	0.41	0.16	15405098	154.05	3840.66
25	13:50	1500	972	0.41	0.16	15405098	154.05	3994.71
26	13:51	1560	958	0.41	0.16	15183213.9	151.83	4146.54
27	13:52	1620	978	0.41	0.16	15500191.2	155.00	4301.54
28	13:53	1680	982	0.41	0.16	15563586.6	155.64	4457.18
29	13:54	1740	991	0.41	0.16	15706226.4	157.06	4614.24
30	13:55	1800	995	0.41	0.16	15769621.9	157.70	4771.94

Cuadro 58. Repetición 3. Cálculo de la irradiancia acumulada para 30 minutos - 1:35

N°	Hora	Tiempo en (s)	Irradiancia instantánea lx/m <sup>2</sup> * 100	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen (dm <sup>3</sup> )	lx/l	lx/l*10 <sup>6</sup>	Irradiancia acumulada lx/l*10 <sup>6</sup>
1	12:50	60	1069	0.41	0.16	16942438	169.42	169.42
2	12:51	120	1081	0.41	0.16	17132624.4	171.33	340.75
3	12:52	180	1077	0.41	0.16	17069228.9	170.69	511.44
4	12:53	240	1074	0.41	0.16	17021682.3	170.22	681.66
5	12:54	300	1076	0.41	0.16	17053380.1	170.53	852.19
6	12:55	360	1073	0.41	0.16	17005833.5	170.06	1022.25
7	12:56	420	1071	0.41	0.16	16974135.7	169.74	1191.99
8	12:57	480	1072	0.41	0.16	16989984.6	169.90	1361.89
9	12:58	540	1083	0.41	0.16	17164322.1	171.64	1533.54
10	12:59	600	1080	0.41	0.16	17116775.5	171.17	1704.70
11	13:00	660	1072	0.41	0.16	16989984.6	169.90	1874.60
12	13:01	720	1066	0.41	0.16	16894891.4	168.95	2043.55
13	13:02	780	1075	0.41	0.16	17037531.2	170.38	2213.93
14	13:03	840	1065	0.41	0.16	16879042.5	168.79	2382.72

15	13:04	900	1058	0.41	0.16	16768100.5	167.68	2550.40
16	13:05	960	1060	0.41	0.16	16799798.2	168.00	2718.40
17	13:06	1020	1049	0.41	0.16	16625460.7	166.25	2884.65
18	13:07	1080	1048	0.41	0.16	16609611.8	166.10	3050.75
19	13:08	1140	1037	0.41	0.16	16435274.3	164.35	3215.10
20	13:09	1200	1049	0.41	0.16	16625460.7	166.25	3381.36
21	13:10	1260	1048	0.41	0.16	16609611.8	166.10	3547.45
22	13:11	1320	1052	0.41	0.16	16673007.3	166.73	3714.18
23	13:12	1380	1060	0.41	0.16	16799798.2	168.00	3882.18
24	13:13	1440	1063	0.41	0.16	16847344.8	168.47	4050.65
25	13:14	1500	1044	0.41	0.16	16546216.4	165.46	4216.12
26	13:15	1560	1038	0.41	0.16	16451123.2	164.51	4380.63
27	13:16	1620	1039	0.41	0.16	16466972	164.67	4545.30
28	13:17	1680	1045	0.41	0.16	16562065.2	165.62	4710.92
29	13:18	1740	1051	0.41	0.16	16657158.4	166.57	4877.49
30	13:19	1800	1050	0.41	0.16	16641309.6	166.41	5043.90

---



Figura 23. Estructura del colector parabólico solar.



Figura 24. Colector parabólico solar en funcionamiento.



Figura 25. Caracterización de parámetros iniciales para el proceso Foto-Fenton.



Figura 26. Determinación del índice de oxidabilidad al permanganato.



Figura 27. Agregado de perlas de vidrio para la determinación del índice de oxidabilidad al permanganato.



Figura 28. Determinación de coliformes totales y coliformes termotolerantes.





Figura 29. Prueba no confirmativa para Coliformes totales termotolerantes.



Figura 30. Prueba no confirmativa para Coliformes totales.

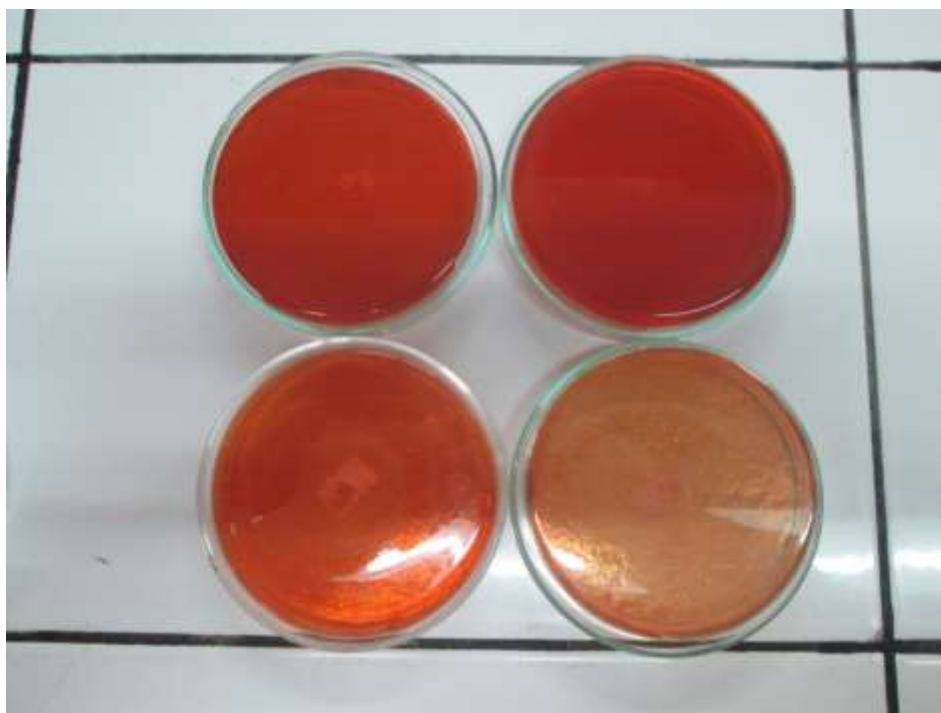


Figura 31. Determinación de *Salmonella*.

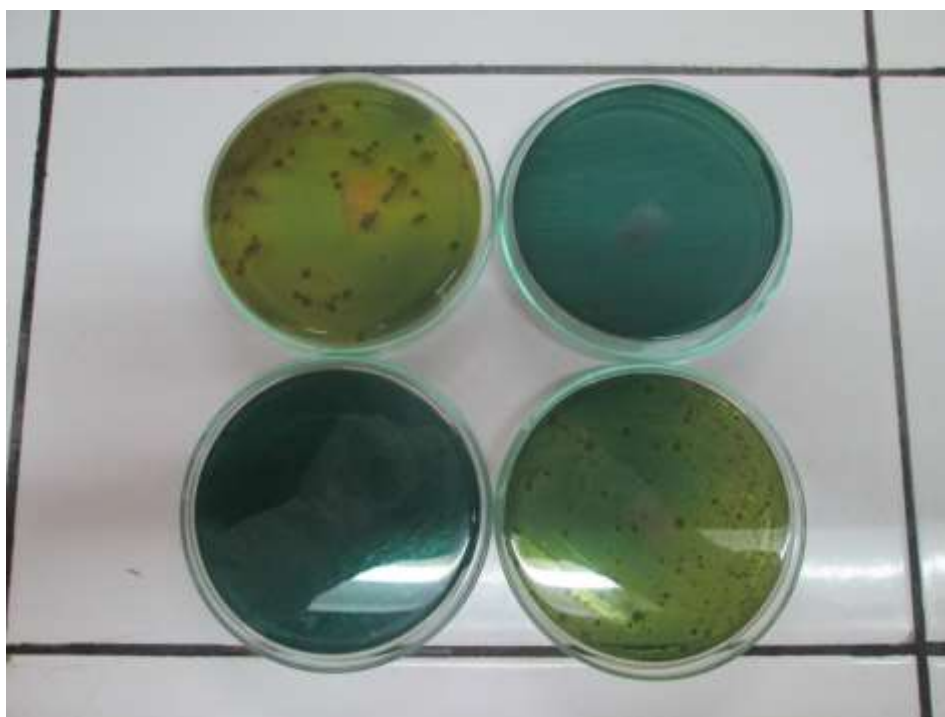


Figura 32. Determinación de *Vibrión cholera*.



Figura 33. Determinación de sólidos totales suspendidos y disueltos.



Figura 34. Tratamiento Foto-Fenton con 10 minutos de TRH.

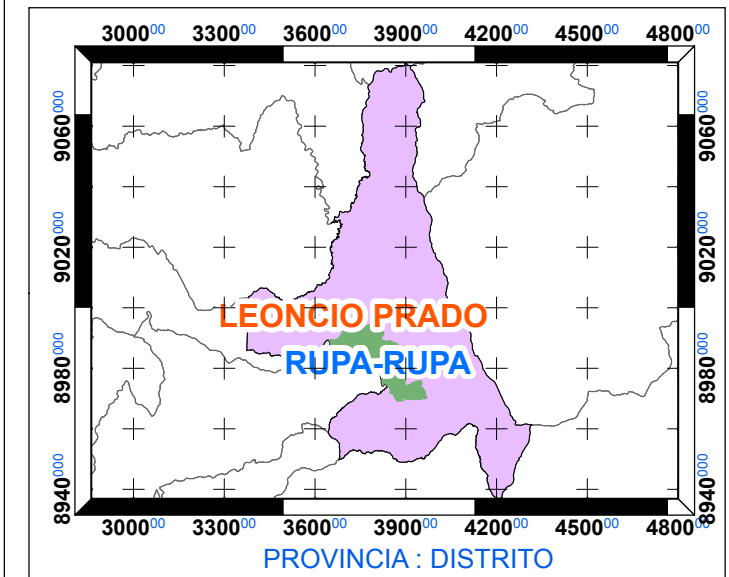
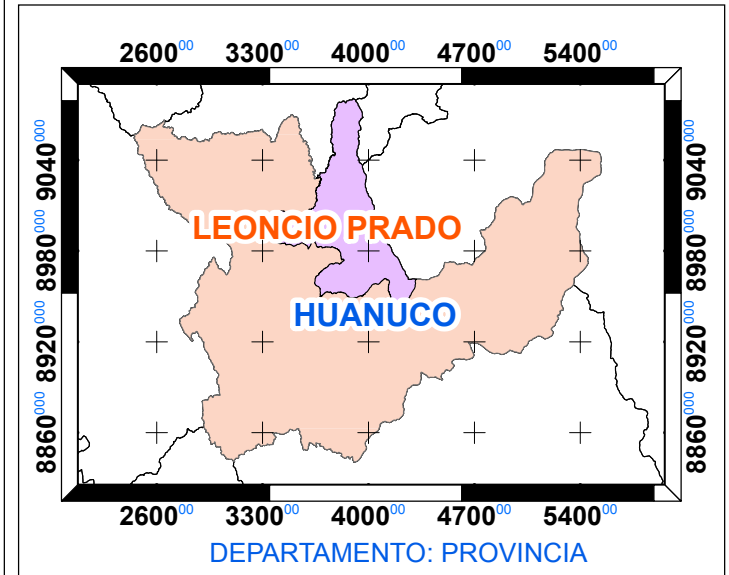
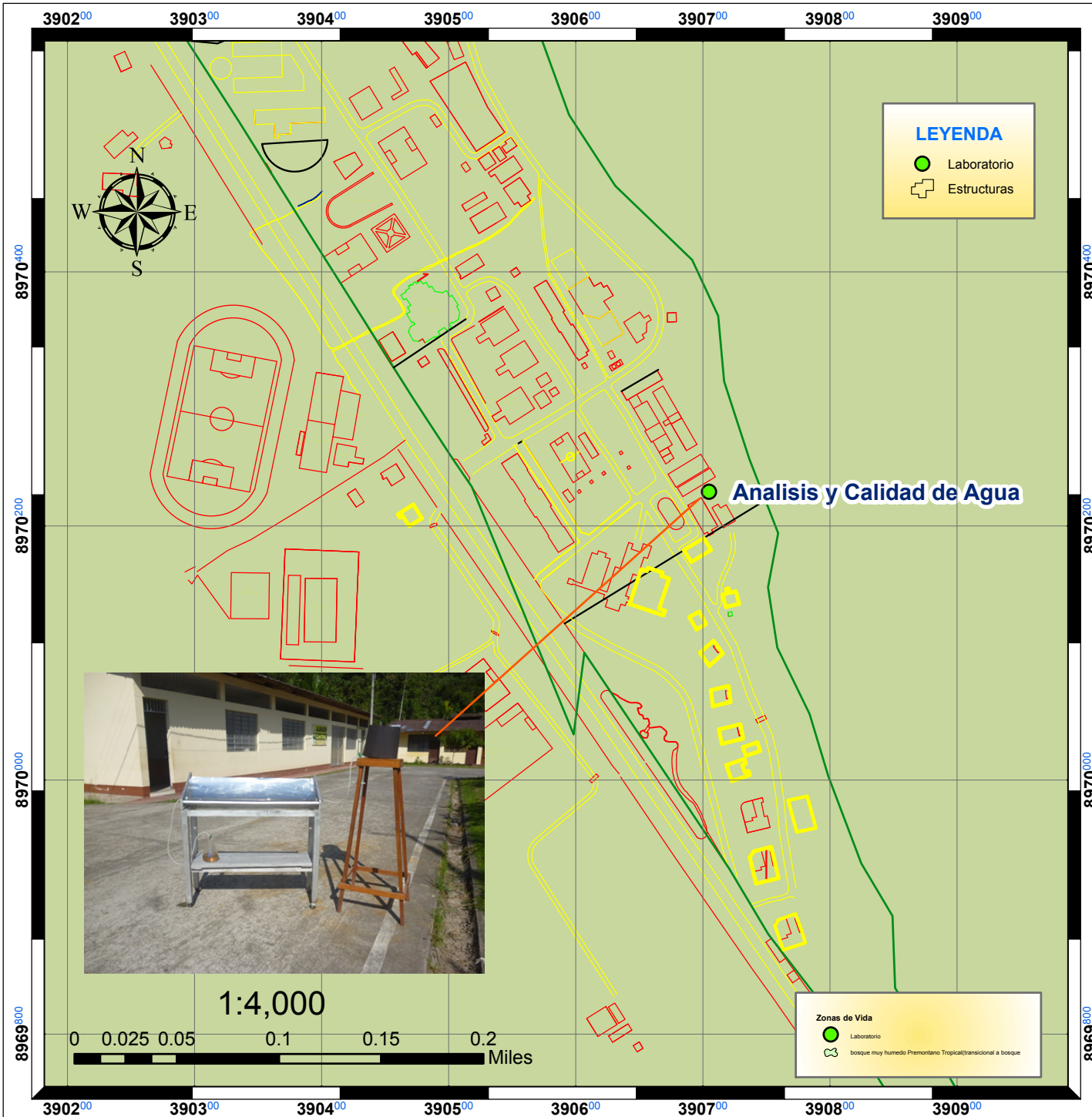


Figura 35. Tratamiento Foto-Fenton con 20 minutos de TRH.

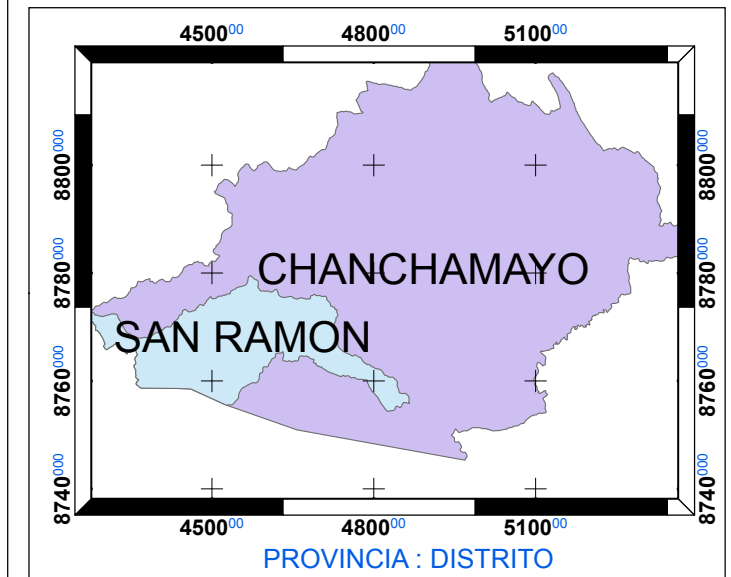
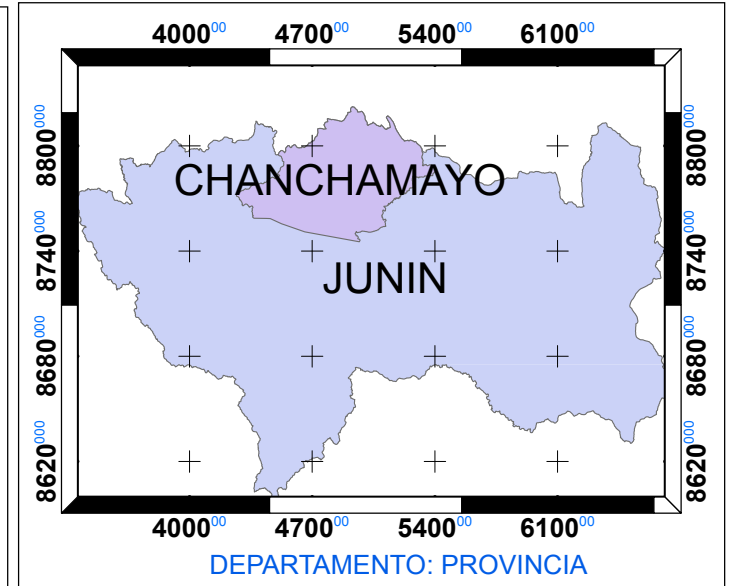



Figura 36. Tratamiento Foto-Fenton con 30 minutos de TRH.





		UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA		
		FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
		INGENIERIA AMBIENTAL		
Plano:	MAPA UBICACIÓN		REVISADO Y APROVADO	
			Ing MSc.BLAS	
			MATIENZO,Jose Antonio	
UBICACIÓN:	FECHA: 10-07-17	ESCALA: Indicada	LÁMINA:	
Distrito : RUPA RUPA	BACHILLER:	MAYORCA	<b>UB-02</b>	
Provincia : LEONCIO PRADO		MALPARTIDA NELLY		
Región :HUANUCO		MAGALY		



 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES INGENIERIA AMBIENTAL		
<b>Plano:</b>	MAPA UBICACIÓN	
<b>UBICACIÓN:</b> Distrito : RUPA RUPA Provincia : LEONCIO PRADO Región : HUANUCO	<b>FECHA:</b> 10-07-17 <b>BACHILLER:</b>	<b>ESCALA:</b> Indicada MAYORCA MALPARTIDA NELLY MAGALY
		<b>LÁMINA:</b> <b>UB-01</b>

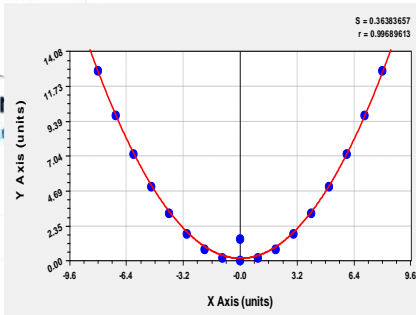


# DATOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO DEL COLECTOR PARABÓLICO SOLAR

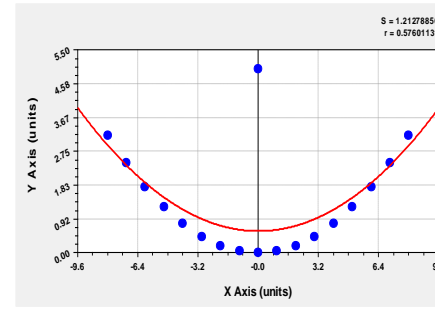


## MAPA SOLAR DE LATINOAMÉRICA

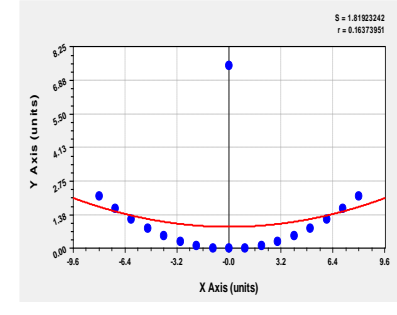
Los valores mostrados sobre las curvas expresan la irradiación media solar diaria recibida sobre una superficie orientada hacia el ecuador y óptimamente inclinada, en el mes de más baja irradiación incidente sobre dicha superficie, en kWh/m².



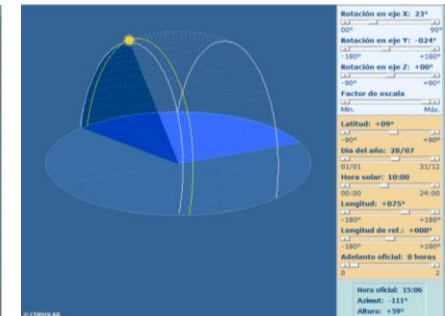
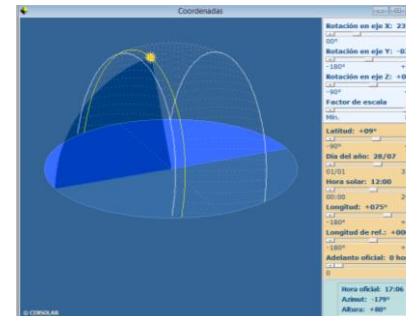
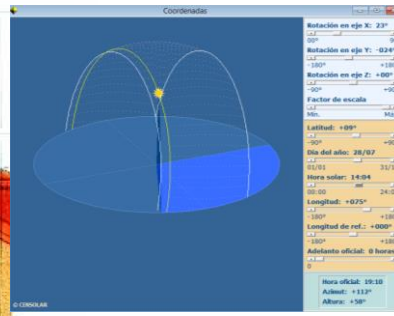
$$X^2 = 5y$$



$$X^2 = 20y$$



$$X^2 = 30y$$



Reflectancia del aluminio 0.85

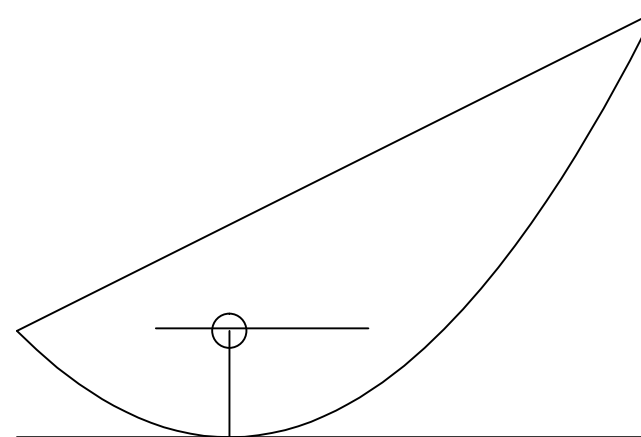
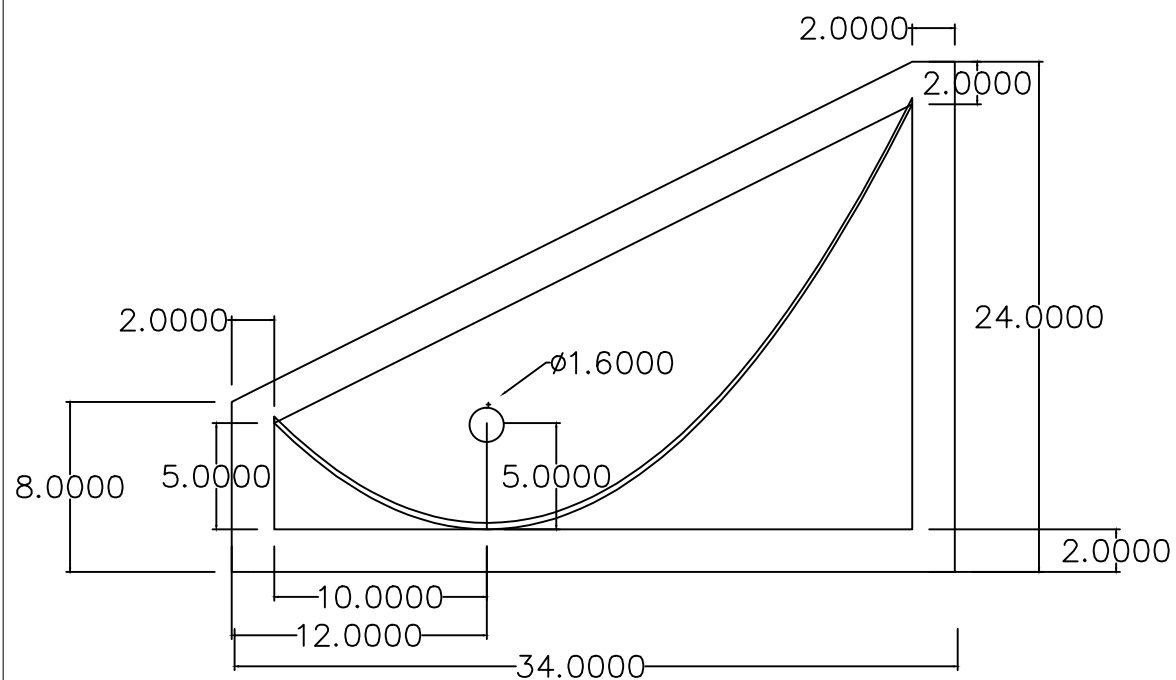
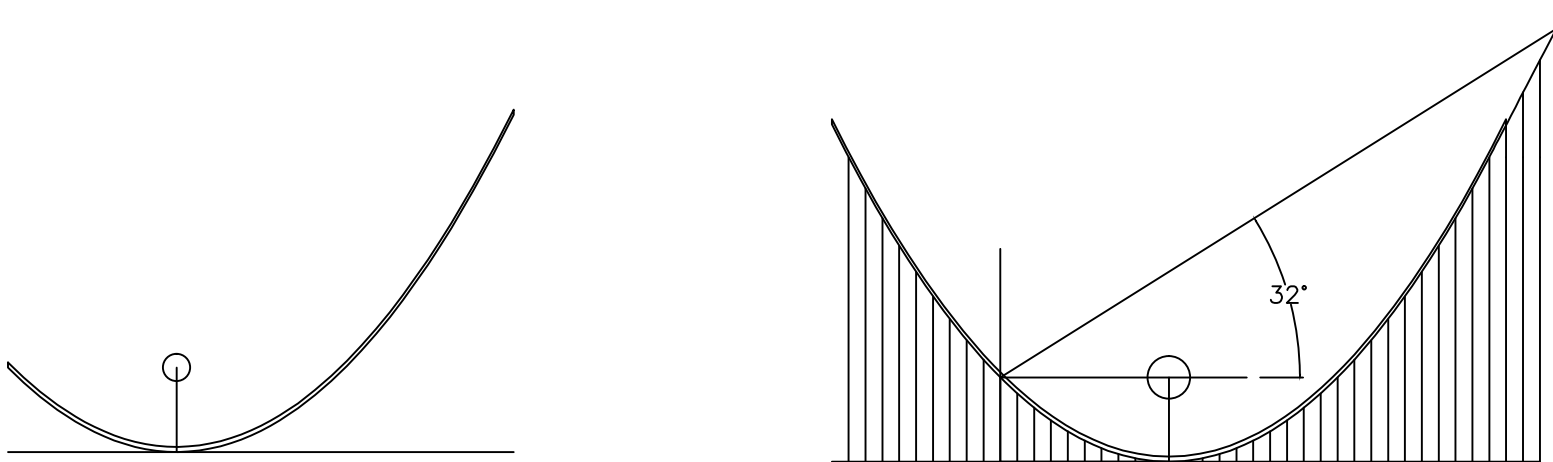
Transmitancia del tubo de borosilicato 0.90

Ángulo de corte en la parábola 32°



 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES INGENIERIA AMBIENTAL				 REVISADO Y APROBADO Ing LOPEZ VILLANUEVA, Antonio Emel	
Plano:	VISTA 3D DEL COLECTOR PARABÓLICO SOLAR				
UBICACIÓN:	FECHA:	ESCALA:	LÁMINA:		
Distrito : RUPA RUPA	10-05-16	Indicada	MAYORCA		
Provincia : LEONCIO PRADO	BACHILLER:	MALPARTIDA NELLY	D-02		
Región : HUANUCO		MAGALY			

## VISTA LATERAL DEL COLECTOR PARABÓLICO SOLAR



 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES INGENIERIA AMBIENTAL			
Plano:		VISTA LATERAL DEL COLECTOR PARABÓLICO SOLAR	REVISADO Y APROVADO Ing. LOPEZ VILLANUEVA, Antonio Emel
UBICACIÓN:	FECHA:	ESCALA:	LÁMINA:
Distrito : RUPA RUPA	10-05-16	Indicada	MAYORCA
Provincia : LEONCIO PRADO	BACHILLER:	MALPARTIDA NELLY	MAGALY
Región : HUANUCO			<b>D-01</b>