

**Proyecto de integración
Licenciatura en Ingeniería Ambiental**

**Diseño del proceso de tratamiento del lixiviado del
relleno sanitario CEMIRQ utilizando Oxidación
Fenton, Ozonación y UV**

Presenta

Sebastián Díaz Rodea

Matrícula: 2152002207

Asesores:

Dra. Icela Dagmar Barceló Quintal

Dr. Hugo Eduardo Solís Correa

DECLARATORIA

Yo, Icela Dagmar Barceló Quintal, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dra. Icela Dagmar Barceló Quintal

Yo, Hugo Eduardo de Jesús Solís Correa, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dr. Hugo Eduardo de Jesús Solís Correa

Yo, Sebastián Díaz Rodea, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Sebastián Díaz Rodea

Resumen

Una de las características de los lixiviados ya estabilizados provenientes de rellenos sanitarios es su difícil degradación, principalmente porque la materia orgánica contenida es recalcitrante. Para la recolección de muestras se seleccionaron cuatro sitios, donde se muestrearon tres puntos, midiendo en cada sitio y sus puntos parámetros in situ como temperatura, pH, conductividad, potencial redox (ORP) y oxígeno disuelto (OD). Por otro lado, se determinaron parámetros ex situ como, los Sólidos Totales (ST), los Sólidos Suspendidos (SST) y por diferencia se obtuvieron los Sólidos Disueltos (SDT); así mismo, se midió la Demanda Química de Oxígeno (DQO) tanto del lixiviado crudo, como en las degradaciones de los lixiviados acidificados y de las oxidaciones Fenton, Ozono y UV, utilizando este parámetro en el seguimiento de las cinéticas de degradación. Ya con los resultados se aplicó el software ARCGIS para el estudio de la distribución en la laguna de los parámetros medidos in situ y los ex situ. En este estudio como se ha indicado se aplicaron tres procesos avanzados de oxidación: Fenton, Ozonación e irradiación con luz Ultravioleta, donde estos últimos se probaron primero en continuo, pero en forma independiente y luego en forma combinada simultáneamente. Primero se ajustó el pH para una oxidación Fenton, donde fue importante para su eficiencia optimizar la relación Fe^{2+}/H_2O_2 . La eficiencia de los tratamientos Ozono y UV se estudiaron mediante las cinéticas de degradación. Las gráficas de $\ln(C_i/C_o)$ vs tiempo, demostraron que los procesos cinéticos son de orden uno, con coeficientes de regresión (R^2) muy aceptables y constantes de velocidad (K) extraordinariamente semejantes, tanto en los procesos en continuo e independientes, como en los combinados simultáneos. En cuanto a la eficiencia se demostró que con el proceso Fenton se logró el porcentaje de mayor degradación de los lixiviados, de manera que el complemento se efectuó con la oxidación con Ozono y el pulimento con la radiación UV. En cuanto la oxidación combinada Ozono-UV, se logró en un solo paso, tanto el complemento de degradación como el pulimento. Finalmente, mediante la Espectroscopía Infrarroja (IR), se observó en el lixiviado crudo un conjunto de picos, donde en el proceso de acidificación desaparecieron algunos y después de la oxidación Fenton desaparecieron o disminuyeron otros.

Agradecimientos

A mi asesora la Dra. Icela Dagmar Barceló Quintal por su entusiasmo al dirigirme y guiarme en la obtención de mi grado, por el conocimiento que me brindó y por las experiencias que me compartió y me formaron para lograr este objetivo profesional.

A mi asesor el Dr. Hugo Eduardo de Jesús Solís Correa, por acompañarme durante el desarrollo de el presente trabajo.

A la Dra. Carmen del Pilar Tello Espinoza por asesorarme y brindarme su apoyo durante el primer proceso del proyecto.

Al Centro Ecológico de Manejo Integral de Residuos Querétaro (CEMIRQ) por facilitarme y poner a mi disposición sus instalaciones para poder realizar el presente escrito, en especial al Ing. Víctor Hugo Lugo.

Al Ing. Samuel D., Fernanda G. y Yisel D., por su ayuda y apoyo en el proceso de muestreo.

A la Universidad Autónoma Metropolitana que me brindó todas las herramientas formativas para lograr el desarrollo profesional y personal que siempre busqué.

A la Universidad Nacional del Litoral por la oportunidad de realizar una parte de mis estudios durante mi estancia en Argentina.

A mis amigos y compañeros universitarios, Axel, Diego, Lilia, Susana; por la compañía durante mis años de estudiante, pero en especial a la RAE 1 por las experiencias vividas, los conocimientos y aptitudes adquiridos y por su amistad y cariño.

Dedicatoria

“... Siempre existe tierra firme y la luz de un faro para llevarme al muelle y abastecerme de provisiones. Ahí me dieron lo necesario para navegar, me enseñaron a pescar y a tener firmeza en la tempestad. Yo salí al mar, y aun cuando tengo mi propia nave y decisión, de cuando en cuando suelo mirar, no atrás, si no al faro que incesante y constante siempre esta.

El otro inquirió, ¿A caso conoces tal lugar?

Yo respondí, sí, mi familia, mi hogar...”

Dedicado a mis padres, quienes siempre me dieron el ejemplo y su apoyo para lograr cumplir mis objetivos y transformar mis sueños en realidad.

Tabla de Contenido

| | |
|---|-----------|
| DECLARATORIA | II |
| RESUMEN..... | III |
| AGRADECIMIENTOS | IV |
| DEDICATORIA | V |
| TABLA DE CONTENIDO | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | IX |
| ÍNDICE DE TABLAS | XII |
| | |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES | 13 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1.1.1 <i>La Química Verde</i> | 15 |
| 1.1.2 <i>La Química Ambiental</i> | 16 |
| 1.1.3 <i>La Ecología Industrial</i> | 16 |
| 1.1.4 <i>Disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) y generación de Lixiviados</i> | 17 |
| 1.2 ANTECEDENTES | 17 |
| 1.2.1 <i>Tratamiento de los lixiviados</i> | 20 |
| 1.2.1.1 Tratamientos biológicos | 20 |
| 1.2.1.2 Tratamiento por procesos de oxidación avanzada | 20 |
| 1.2.2 <i>Características de lixiviados</i> | 21 |
| | |
| CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS Y DIAGRAMA DEL PROYECTO | 23 |
| 2.1 JUSTIFICACIÓN | 24 |
| 2.2 OBJETIVOS | 24 |
| 2.2.1 <i>Objetivo General</i> | 24 |
| 2.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> | 24 |
| 2.2.3 <i>Diagrama del proyecto</i> | 25 |
| | |
| CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO | 26 |
| 3.1 CONCEPTO DE RELLENO SANITARIO | 27 |
| 3.1.1 <i>Relleno sanitario mecanizado</i> | 27 |
| 3.1.2 <i>Relleno sanitario semimecanizado</i> | 27 |
| 3.1.3 <i>Relleno sanitario manual</i> | 28 |
| 3.2 LAS MEDIDAS Y ESTUDIOS QUE SE DEBEN REALIZAR PARA UN RELLENO SANITARIO | 28 |
| 3.2.1 <i>Estudio detallado del impacto ambiental, económico y social</i> | 28 |
| 3.2.2 <i>Ventajas</i> | 28 |
| 3.2.3 <i>Desventajas</i> | 29 |
| 3.3 IMPORTANCIA DE LA SELECCIÓN DEL SITIO Y DEL DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO | 29 |
| 3.3.1 <i>Planificación y diseño</i> | 30 |
| 3.3.2 <i>Construcción del Relleno Sanitario</i> | 30 |
| 3.4 CONCEPTO DE LIXIVIADOS | 31 |
| 3.4.1 <i>Definición de Lixiviado</i> | 31 |
| 3.4.2 <i>Características de los lixiviados</i> | 31 |
| 3.4.2.1 Los lixiviados jóvenes..... | 31 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 3.4.2.2 | Los lixiviados intermedios | 31 |
| 3.4.2.3 | Los lixiviados estabilizados..... | 31 |
| 3.5 | DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA | 32 |
| 3.5.1 | <i>Fase I: Ajuste inicial</i> | 32 |
| 3.5.2 | <i>Fase II: Fase de transición</i> | 32 |
| 3.5.3 | <i>Fase III: Fase ácida</i> | 33 |
| 3.5.4 | <i>Fase IV: Fase de fermentación del metano</i> | 33 |
| 3.5.5 | <i>Fase V: Fase de maduración</i> | 34 |
| 3.6 | TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS POR OXIDACIÓN AVANZADA | 36 |
| 3.6.1 | <i>Reactivo Fenton</i> | 36 |
| 3.6.2 | <i>Tratamiento mediante reacción de Ozono</i> | 38 |
| 3.6.3 | <i>Reacción con UV</i> | 40 |
| CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL | | 47 |
| 4.1 | UBICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO | 48 |
| 4.2 | DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS Y QUÍMICOS | 50 |
| 4.2.1 | <i>Parámetros In Situ</i> | 50 |
| 4.2.2 | <i>Parámetros Ex situ</i> | 50 |
| 4.2.2.1 | Determinación de los Sólidos Totales (ST), Suspendidos (SST) y Disueltos (SDT)..... | 50 |
| 4.2.2.2 | Análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)..... | 50 |
| 4.2.2.3 | Seguimiento de las diferentes etapas de tratamiento mediante Espectroscopía Infrarroja | 51 |
| 4.2.2.4 | Oxidación por el reactivo Fenton | 51 |
| 4.2.2.5 | Ajuste del pH | 52 |
| 4.2.2.6 | 4.2.2.3. Relación Fe/H ₂ O ₂ | 52 |
| 4.2.2.7 | Caracterización por Infrarrojo | 52 |
| 4.2.2.8 | Oxidación por Ozono | 52 |
| 4.2.2.9 | Tratamiento de pulimento por radiación UV | 53 |
| 4.2.2.10 | Sistema combinado Ozonación-UV | 54 |
| 4.3 | INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS | 55 |
| 4.3.1 | <i>Se determinó la eficiencia de la remoción mediante el proceso Fenton</i> | 55 |
| 4.3.2 | <i>Se determinó la eficiencia de la remoción mediante la Ozonación</i> | 55 |
| 4.3.3 | <i>Se determinó la eficiencia de la remoción mediante la radiación por UV</i> | 55 |
| 4.3.4 | <i>Se determinó la eficiencia de la remoción mediante el método combinado y simultáneo Ozono-UV</i> | 55 |
| 4.4 | DISTRIBUCIÓN DE LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS Y QUÍMICOS MEDIANTE EL SOFTWARE ARCGIS | 55 |
| CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y SU INTERPRETACIÓN | | 56 |
| 5.1 | SOFTWARE ARCGIS | 57 |
| 5.1.1 | <i>Distribución de la temperatura según el software Arcgis</i> | 57 |
| 5.1.2 | <i>Distribución de la conductividad según el software Arcgis</i> | 58 |
| 5.1.3 | <i>Distribución del pH según el software Arcgis</i> | 59 |
| 5.1.4 | <i>Distribución del Potencial Redox (ORP) según el software Arcgis</i> | 59 |
| 5.1.5 | <i>Distribución del Oxígeno Disuelto (OD) según el software Arcgis</i> | 60 |
| 5.1.6 | <i>Distribución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) según el software Arcgis</i> | 61 |
| 5.1.7 | <i>Distribución de los Sólidos Totales según el software Arcgis</i> | 62 |
| 5.1.8 | <i>Distribución de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) según el software Arcgis</i> | 63 |
| 5.1.9 | <i>Distribución de los Sólidos Disueltos Totales (SDT) según el software Arcgis</i> | 63 |
| 5.2 | RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS <i>IN SITU</i> | 64 |
| 5.2.1 | <i>Resultados de la temperatura</i> | 65 |

| | | |
|---|--|------------|
| 5.2.2 | <i>Resultados del pH</i> | 65 |
| 5.2.3 | <i>Resultados de la conductividad</i> | 66 |
| 5.2.4 | <i>Resultados del potencial redox (ORP)</i> | 66 |
| 5.2.5 | <i>Resultados del oxígeno disuelto (OD)</i> | 67 |
| 5.3 | RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS <i>EX SITU</i> | 68 |
| 5.3.1 | <i>Determinación de los Sólidos Totales (ST)</i> | 68 |
| 5.3.2 | <i>Determinación de los Sólidos Suspendedos (SST)</i> | 69 |
| 5.3.3 | <i>Determinación de los Sólidos Disueltos (SDT)</i> | 70 |
| 5.3.4 | <i>Determinación de la DQO en los lixiviados crudos</i> | 70 |
| 5.4 | RESULTADO DEL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR EL PROCESO FENTON | 73 |
| 5.4.1 | <i>Ajuste del pH a los lixiviados crudos y determinación de la DQO</i> | 73 |
| 5.4.2 | <i>Oxidación de los lixiviados después del ajuste del pH mediante la reacción de Fenton</i> | 75 |
| 5.5 | RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR OZONO (O ₃) | 78 |
| 5.5.1 | <i>Oxidación por Ozono (O₃) de los lixiviados previamente tratados por Fenton</i> | 78 |
| 5.6 | RESULTADO DEL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR RADIACIÓN UV | 80 |
| 5.6.1 | <i>Complementación de la oxidación de los lixiviados por radiación UV</i> | 80 |
| 5.7 | RESULTADO DEL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS PREVIAMENTE TRATADOS POR FENTON COMBINANDO OZONO Y UV | 82 |
| 5.8 | OBTENCIÓN DEL RENDIMIENTO Y SU COMPARACIÓN DE LAS OXIDACIONES OZONO Y UV, CON OZONO-UV DE LOS LIXIVIADOS PREVIAMENTE TRATADOS POR FENTON..... | 84 |
| 5.9 | ANÁLISIS DE LOS LIXIVIADOS POR ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA..... | 87 |
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 90 |
| 6.1 | CONCLUSIONES | 91 |
| 6.2 | RECOMENDACIONES..... | 92 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 94 |
| APÉNDICES | | 101 |
| APÉNDICE 1 | | 102 |
| APÉNDICE 2 | | 104 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA 1.1. DESARROLLO SOSTENIBLE (ONU, 1987). | 15 |
| FIGURA 1.2. UNIÓN ENTRE LA QUÍMICA VERDE, QUÍMICA AMBIENTAL Y ECOLOGÍA INDUSTRIAL. (FUENTE: OSORIO, 2010)..... | 16 |
| FIGURA 2.1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROYECTO..... | 25 |
| FIGURA 3.1. CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO SANITARIO TECNIFICADO. | 30 |
| FIGURA 3.2. FASES GENERALES EN LA GENERACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO..... | 32 |
| FIGURA 3.3. RUTA DE PRODUCCIÓN DE METANO Y DIÓXIDO DE CARBONO. | 33 |
| FIGURA 3.4. DIFERENTES VISTAS DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS. | 35 |
| FIGURA 3.5. CHIMENEA PARA QUEMAR BIOGÁS. | 35 |
| FIGURA 3.6. REGIONES DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y DE LA LUZ UV..... | 42 |
| FIGURA 3.7. ESPECTRO DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA. EN EL CÍRCULO ROJO SE ENCUENTRA LA REGIÓN UVC, RADIACIÓN QUE PRODUCE EL MAYOR EFECTO GERMICIDA. | 43 |
| FIGURA 3.8. CONSTRUCCIÓN DE UNA LÁMPARA DE ARCO DE MERCURIO Y DISEÑO DEL BALASTO (WRIGHT Y CAIRNS, 2005). | 44 |
| FIGURA 3.9. SALIDA ESPECTRAL DE LÁMPARAS DE ARCO DE MERCURIO DE BAJA Y MEDIANA PRESIÓN (WRIGHT Y CAIRNS, 2005). | 45 |
| FIGURA 4.1. IMÁGENES SATELITALES DEL RELLENO SANITARIO CEMIRQ DONDE SE MARCA SU LAGUNA DE LIXIVIADOS (FUENTE: GOOGLE EARTH). | 49 |
| FIGURA 4.2. A) DISTRIBUCIÓN DE LOS MUESTREOS POR SITIO. B) MUESTRADOR VAN DORN..... | 49 |
| FIGURA 4.3. A) EQUIPOS DE CAMPO INTERFASE LABQUEST-VERNIER Y B) ELECTRODOS pH, CONDUCTIVIDAD Y ORP..... | 50 |
| FIGURA 4.4. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DQO. | 51 |
| FIGURA 4.5. ESPECTOFOTÓMETRO IR, THERMO SCIENTIFIC MODELO IS10..... | 51 |
| FIGURA 4.6. A) GENERADOR DE OZONO, B) ESQUEMA DEL REACTOR PARA OZONACIÓN Y C) SISTEMA PARA REACCIONES DE DEGRADACIÓN CON OZONO (SOLÍS-CORREA, 2010)..... | 53 |
| FIGURA 4.7. A) LÁMPARA UV UTILIZADA PARA IRRADIAR LAS MUESTRAS Y B) LÁMPARA CON CAJA PROTECTORA | 54 |
| FIGURA 4.8. SISTEMA COMBINADO OZONO-UV | 54 |
| FIGURA 5.1. UBICACIÓN DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS DEL CEMIRQ, QRO. | 57 |
| FIGURA 5.2. DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA LAGUNA DE LIXIVIADOS. | 58 |
| FIGURA 5.3. DISTRIBUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN LA LAGUNA DE LIXIVIADO. | 58 |
| FIGURA 5.4. DISTRIBUCIÓN DEL pH EN LA LAGUNA DE LIXIVIADOS. | 59 |
| FIGURA 5.5. DISTRIBUCIÓN DEL ORP EN LA LAGUNA DE LIXIVIADOS. | 60 |
| FIGURA 5.6. DISTRIBUCIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO EN LA LAGUNA DE LIXIVIADOS. | 61 |
| FIGURA 5.7. DISTRIBUCIÓN DE LA DQO EN LA LAGUNA DE LIXIVIADOS. | 62 |
| FIGURA 5.8. DISTRIBUCIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES (ST) EN LA LAGUNA DE LIXIVIADOS..... | 62 |
| FIGURA 5.9. DISTRIBUCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LA LAGUNA DE LIXIVIADOS. | 63 |
| FIGURA 5.10. DISTRIBUCIÓN DE LOS SÓLIDOS DISUELTOS EN LA LAGUNA DE LIXIVIADOS. | 64 |
| FIGURA 5.11. UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE TOMA DE MUESTRAS. | 64 |
| FIGURA 5.12. VALORES DE LA TEMPERATURA EN CADA SITIO DE LA LAGUNA Y EL PROMEDIO DE LOS CUATRO SITIOS. | 65 |
| FIGURA 5.13. VALORES DEL pH EN CADA SITIO DE LA LAGUNA Y EL PROMEDIO DE LOS CUATRO SITIOS. | 65 |
| FIGURA 5.14. VALORES DE LA CONDUCTIVIDAD EN CADA SITIO DE LA LAGUNA Y EL PROMEDIO DE LOS CUATRO SITIOS. | 66 |
| FIGURA 5.15. DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES DEL SISTEMA CARBONATO. | 66 |
| FIGURA 5.16. VALORES DEL POTENCIAL REDOX (ORP) EN CADA SITIO DE LA LAGUNA Y EL PROMEDIO DE LOS CUATRO SITIOS..... | 67 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 5.17. COLOR EN LA LAGUNA DE LIXIVIADOS DEL CEMIRQ. | 68 |
| FIGURA 5.18. VALORES DEL OD EN CADA SITIO DE LA LAGUNA Y EL PROMEDIO DE LOS CUATRO SITIOS. | 68 |
| FIGURA 5.19. CONCENTRACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES (ST) EN CUATRO SITIOS DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS Y EL PROMEDIO EN LA LAGUNA. | 69 |
| FIGURA 5.20. CONCENTRACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS (SST) EN CUATRO SITIOS DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS Y EL PROMEDIO EN LA LAGUNA. | 69 |
| FIGURA 5.21. CONCENTRACIÓN DE LOS SÓLIDOS DISUELTOS (SDT) EN CUATRO SITIOS DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS Y EL PROMEDIO EN LA LAGUNA. | 70 |
| FIGURA 5.22. CONCENTRACIÓN DE LA DQO EN EL SITIO LAG1 DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS Y EL PROMEDIO DEL SITIO LAG1. | 71 |
| FIGURA 5.23. CONCENTRACIÓN DE LA DQO EN EL SITIO LAG2 DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS Y EL PROMEDIO DEL SITIO LAG2. | 71 |
| FIGURA 5.24. CONCENTRACIÓN DE LA DQO EN EL SITIO LAG3 DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS Y EL PROMEDIO DEL SITIO LAG3. | 72 |
| FIGURA 5.25. CONCENTRACIÓN DE LA DQO EN EL SITIO LAG4 DE LA LAGUNA DE LIXIVIADOS Y EL PROMEDIO DEL SITIO LAG4. | 72 |
| FIGURA 5.26. CONCENTRACIÓN DE LOS PROMEDIOS DE LA DQO EN CADA SITIO DE LA LAGUNA Y EL PROMEDIO GENERAL EN LA LAGUNA. | 72 |
| FIGURA 5.27. RESULTADOS DE LA DQO DE LOS LIXIVIADOS DEL SITIO 1 DESPUÉS DEL AJUSTE DEL pH. | 73 |
| FIGURA 5.28. RESULTADOS DE LA DQO DE LOS LIXIVIADOS DEL SITIO 2 DESPUÉS DEL AJUSTE DEL pH. | 74 |
| FIGURA 5.29. RESULTADOS DE LA DQO DE LOS LIXIVIADOS DEL SITIO 3 DESPUÉS DEL AJUSTE DE pH. | 74 |
| FIGURA 5.30. RESULTADOS DE LA DQO DE LOS LIXIVIADOS DEL SITIO 4 DESPUÉS DEL AJUSTE DEL pH. | 74 |
| FIGURA 5.31. RESULTADOS DE LAS DQO PROMEDIO DE LOS LIXIVIADOS Y DEL PROMEDIO DE LA LAGUNA DESPUÉS DEL AJUSTE DEL PH. | 75 |
| FIGURA 5.32. RESULTADOS DE LA DQO DE LOS LIXIVIADOS DEL SITIO 1 DESPUÉS DE LA OXIDACIÓN FENTON. | 76 |
| FIGURA 5.33. RESULTADOS DE LA DQO DE LOS LIXIVIADOS DEL SITIO 2 DESPUÉS DE LA OXIDACIÓN FENTON. | 76 |
| FIGURA 5.34. RESULTADOS DE LA DQO DE LOS LIXIVIADOS DEL SITIO 3 DESPUÉS DE LA OXIDACIÓN FENTON. | 77 |
| FIGURA 5.35. RESULTADOS DE LA DQO DE LOS LIXIVIADOS DEL SITIO 4 DESPUÉS DE LA OXIDACIÓN FENTON. | 77 |
| FIGURA 5.36. RESULTADOS DE LAS DQO PROMEDIO DE LOS LIXIVIADOS Y DEL PROMEDIO DEL PROMEDIO DE LA LAGUNA DESPUÉS DE LA OXIDACIÓN FENTON. | 78 |
| FIGURA 5.37. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR OZONACIÓN DEL LIXIVIADO (SITIO 1)... | 79 |
| FIGURA 5.38. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR OZONACIÓN DEL LIXIVIADO (SITIO 2)... | 79 |
| FIGURA 5.39. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR OZONACIÓN DEL LIXIVIADO (SITIO 3)... | 80 |
| FIGURA 5.40. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE DEGRADACIÓN POR OZONACIÓN DEL LIXIVIADO (SITIO 4)... | 80 |
| FIGURA 5.41. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN UV DEL LIXIVIADO (SITIO 1)... | 81 |
| FIGURA 5.42. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR UV DEL LIXIVIADO (SITIO 2)... | 81 |
| FIGURA 5.43. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR UV DEL LIXIVIADO (SITIO 3)... | 82 |
| FIGURA 5.44. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR UV DEL LIXIVIADO (SITIO 4)... | 82 |
| FIGURA 5.45. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR OZONO-UV DEL LIXIVIADO (SITIO 1)... | 83 |
| FIGURA 5.46. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR OZONO-UV DEL LIXIVIADO (SITIO 2)... | 83 |
| FIGURA 5.47. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR OZONO-UV DEL LIXIVIADO (SITIO 3)... | 84 |
| FIGURA 5.48. GRÁFICAS DE LAS CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN POR OZONO-UV DEL LIXIVIADO (SITIO 4)... | 84 |
| FIGURA 5.49. A). GRÁFICAS DEL RENDIMIENTO DE LOS PROCESOS OZONO Y UV INDEPENDIENTES. B) GRÁFICAS DE LOS PROCESOS COMBINADOS Y SIMULTÁNEOS OZONO-UV (SITIO 1)... | 85 |
| FIGURA 5.50. A) GRÁFICAS DEL RENDIMIENTO DE LOS PROCESOS OZONO Y UV INDEPENDIENTES. B) GRÁFICAS DE LOS PROCESOS COMBINADOS Y SIMULTÁNEOS OZONO-UV (SITIO 2)... | 85 |
| FIGURA 5.51. A). GRÁFICAS DEL RENDIMIENTO DE LOS PROCESOS OZONO Y UV INDEPENDIENTES. B) GRÁFICAS DE LOS PROCESOS COMBINADOS Y SIMULTÁNEOS OZONO-UV (SITIO 3)... | 86 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 5.52. A). GRÁFICAS DEL RENDIMIENTO DE LOS PROCESOS OZONO Y UV INDEPENDIENTES. B) GRÁFICAS DE LOS PROCESOS COMBINADOS Y SIMULTÁNEOS OZONO-UV (SITIO 4)..... | 86 |
| FIGURA 5.53. A) ESPECTRO DE IR DEL LC, B) ESPECTRO DE IR DEL LA Y C) ESPECTRO IR DEL LF..... | 87 |

Índice de Tablas

| | |
|---|--------------------------------------|
| TABLA 3.1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL OZONO | 38 |
| TABLA 3.2. APLICACIONES DE LA DESINFECCIÓN UV. | 40 |
| TABLA 3.3. APLICACIONES DE LA DESINFECCIÓN UV (CONTINUACIÓN). | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| TABLA 5.1. GRUPOS FUNCIONALES PRESENTES EN CADA ETAPA DEL TRATAMIENTO DEL LIXIVIADO. | 88 |

Capítulo 1

Introducción y Antecedentes

Introducción y Antecedentes

1.1 Introducción

La contaminación natural ha sido siempre desde que se originó la Tierra; las sustancias contaminantes se dispersan y transportan sobre y dentro de los recursos naturales modificando sus características originales. Sin embargo, desde la aparición del hombre y a medida que fue evolucionando, la contaminación fue crecido notablemente. El siglo XVIII de la Revolución Industrial, el incremento del conocimiento, de la tecnología y del comercio hizo del hombre un consumidor implacable y derrochador de recursos naturales, generando gran cantidad de residuos sólidos y originando los problemas que hoy en día están reconocidos, como la lluvia ácida y el calentamiento global del planeta, que desde entonces no han dejado de agravarse, incrementándose por la quema de combustibles fósiles, como el petróleo y el carbón, por las industrias y los vehículos, por más de 200 años. Entre los años 1940 y 1970 surgió un fenómeno llamado Revolución Verde en la cual existió un importante incremento de la productividad agrícola internacional, aplicando grandes cantidades de agua, fertilizantes y plaguicidas, trayendo como consecuencia el daño de la tierra de cultivo, del agua de los mantos freáticos y ríos, entre otros. No necesariamente se trató de usar nuevas tierras de cultivo, sino de incrementar el rendimiento por superficie, es decir, obteniendo más producción por cada hectárea cultivada, y todo ello con la aplicación a las plantaciones de fertilizantes y plaguicidas químicos, productos herbicidas e innovadoras técnicas de riego (PNUD, 2021).

Una opinión cada vez más extendida es que la Revolución Verde, de la forma en que se ha ido conociendo en los últimos años, está llegando al final de un ciclo. Las razones que justifican esta afirmación es que no es posible ampliar más la superficie cultivada (entre otras cosas, por la ausencia del agua suficiente), además de que las variedades de cultivo que han sustentado esta Revolución se encuentran ya al límite de su productividad. El esfuerzo que se ha de hacer es incrementar la productividad por medios diferentes, además de preservar la viabilidad de los ecosistemas, y la protección al medio ambiente. Para todo ello, la innovación tecnológica será la clave. Se estima que para el año 2030, será necesario alimentar a más de 7000 millones de personas en todo el mundo.

Actualmente, gran parte de la humanidad se ha dado cuenta de que el mundo no puede seguir soportando estas prácticas de consumo y es necesario producir de una forma responsable, por lo que la sensibilización, concienciación social y formación ambiental es el arma para crear una legislación fuerte acorde al tiempo que se está viviendo asegurando la calidad de vida de todas las especies y ecosistemas, de ahí que se ha puesto en práctica la idea del desarrollo sostenible o sostenibilidad el cual se define: *“como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social; se entiende como el satisfacer las necesidades de las*

generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades”. Su definición se formalizó por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland (ONU, 1987), fruto de los trabajos de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas, creada en la Asamblea de las Naciones Unidas en 1983. Dicha definición se asumió en el Principio 3° de la Declaración de Río (ONU, 1992). El desarrollo sostenible puede dividirse conceptualmente en tres partes: ecológica, económica y social (Figura 1.1.1). Es necesario satisfacer las necesidades sociales, para generar bienes económicos procurando el equilibrio ecológico, con el fin de evitar que el mundo estalle en catástrofes sociales, económicas o ambientales (PNUD, 2021).

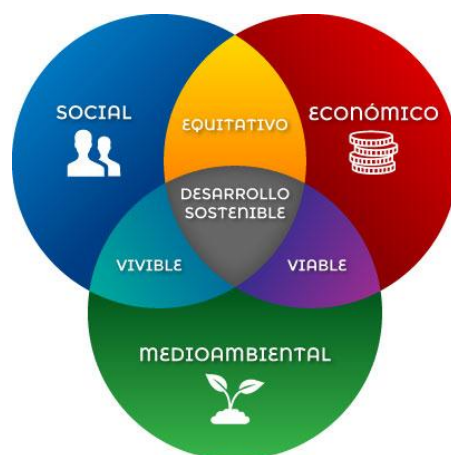


Figura 1.1. Desarrollo Sostenible (ONU, 1987).

En México el desmedido uso de los recursos naturales bajo el criterio de la rentabilidad inmediata ha provocado la destrucción de recursos potenciales cuyo valor no se refleja en el mercado. Esta problemática se agudiza más, dado que el deterioro del medio ambiente, resultado de la acción del hombre, es a la vez el elemento condicionante del desarrollo social, de manera que un desarrollo económico como el que se ha dado en nuestro país afecta la base misma del desarrollo social. Por tanto, a pesar del crecimiento económico nacional no se ha tomado en cuenta la preservación del ambiente, por el contrario, se ha venido degradando cada vez más, debido, probablemente, a la visión cortoplacista de la satisfacción de las necesidades económicas. Por lo que es imperante construir y respetar legislaciones enfocadas al desarrollo sostenible (Escobar, 2007). Para apoyar al desarrollo sostenible es importante conjuntar la filosofía de la Química Verde, Química Ambiental y Ecología Industrial, en la figura 1.1.2, se presenta su interrelación (Osorio, 2010).

1.1.1 La Química Verde

Consiste en el esfuerzo colectivo para reducir al mínimo, o de ser posible eliminar por completo la contaminación desde su inicio, mediante el uso de procesos limpios, evitando al máximo el desperdicio o uso indiscriminado de materias primas no renovables, así como el empleo de materiales peligrosos o contaminantes en la elaboración de productos

químicos limpios, que no atenten contra la salud o el ambiente. Los medios que utiliza la química verde se centran en la disminución o la eliminación del uso de productos químicos tóxicos y el reciclaje de los desechos producidos por el avance tecnológico, de una manera creativa de tal forma que se consiga un mínimo impacto a los seres humanos y al medio ambiente, sin sacrificar el avance científico y tecnológico (Gómez, 2009).



Figura 1.2. Unión entre la Química Verde, Química Ambiental y Ecología Industrial. (Fuente: Osorio, 2010)

1.1.2 La Química Ambiental

Consiste en el estudio de las fuentes, reacciones, transporte, efectos y destinos de las especies químicas en agua, suelo y aire en un ecosistema y los efectos que tiene la tecnología sobre éste. Es la aplicación de la química al estudio de los problemas y la conservación del ambiente (Manahan, 1994).





1.1.3 La Ecología Industrial

Se define como un área de conocimiento que busca que los sistemas industriales tengan un comportamiento similar al de los ecosistemas naturales, transformando el modelo lineal de los sistemas productivos en un modelo cíclico, impulsando las interacciones entre economía, ambiente y sociedad e incrementando la eficiencia de los procesos industriales, por lo tanto consiste en el intercambio de materia entre un grupo de industrias en forma cíclica, para reducir la contaminación de una forma rentable, para lo cual utiliza y aprovecha cada uno de los residuos y subproductos de una industria como materia prima para otra, este sistema relaciona todas las actividades humanas proponiendo una integración de los aspectos, económicos sociales y medioambientales, para lograr que el desarrollo sea económicamente sostenible (Erkman, 2003).

1.1.4 Disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) y generación de Lixiviados

La disposición final de los residuos sólidos municipales es la acción de depositarlos permanentemente en sitios y condiciones adecuados para evitar daños al ambiente. Sin embargo, esta premisa no siempre se cumple, debido a que por lo general los sitios generalmente no satisfacen las características necesarias.

En México, los sitios de disposición final son:

-  rellenos sanitarios,
-  rellenos de tierra controlados,
-  rellenos de tierra no controlados, y
-  los tiraderos a cielo abierto.

Un relleno sanitario planificado, terminada su vida útil, ofrece excelentes perspectivas de una nueva puesta en valor del sitio gracias a su eventual utilización con otros fines, como son las actividades silvoagropecuarias a largo plazo, la recuperación de los terrenos y la mejora del paisaje. Otros sitios destinados para la disposición final de residuos sólidos municipales son los rellenos de tierra controlados, los cuales cuentan parcialmente con inspección, vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas. Los rellenos de tierra no controlados son oquedades donde se vierten y mezclan diversos tipos de residuos sólidos municipales sin control o protección al ambiente. Por último, los tiraderos a cielo abierto son aquellos sitios en donde clandestinamente se depositan y acumulan los desechos sólidos municipales sin ningún control técnico. Estos pueden ser lotes baldíos, barrancas, ríos, arroyos, manglares y otros cuerpos de agua, entre otros.

En la mayoría de los países el destino final más común de los residuos sólidos son los rellenos sanitarios. Sin embargo, uno de los problemas ambientales más graves en la actualidad se deriva de los residuos líquidos que generan, mejor conocidos como lixiviados (Renou *et al.* 2008, Droppelmann y Oettinger 2009). Así aproximadamente el 95% del total de residuos sólidos municipales (RSM) recolectados en el mundo, son dispuestos usando el método del relleno sanitario principalmente el tecnificado (Kurniawan *et al.* 2006; Kurniawan y Li, 2009; Li *et al.*, 2010).

1.2 Antecedentes

El crecimiento de la actividad humana pone en riesgo el medio ambiente y la salud pública en muchos lugares del mundo debido a la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) que es uno de los problemas más graves de la sociedad y el establecimiento de un sistema adecuado de gestión de éstos en los países en vías de desarrollo ha sido bastante difícil, por ejemplo en México el volumen estimado de generación de RSU creció alrededor de 28%, entre los años 1997 y 2008, pasando de 29.3 a 37.6 millones de toneladas, de los cuales tan

solo el 67% de los RSU generados en el país se dispuso en rellenos sanitarios y sitios controlados y el 33% restante en sitios no controlados, donde la mayoría se encuentra a cielo abierto y realmente es un vertedero. Considerando el tipo de localidad, en las zonas metropolitanas más del 80% de los RSU se dispuso en rellenos sanitarios o sitios controlados, mientras que en las localidades rurales y semiurbanas este porcentaje apenas alcanzó el 3.2%. En cuanto al número de rellenos sanitarios en México, entre 1995 y 2007 la cifra creció de 30 a 114 sitios (SEMARNAT, 2009),

La disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos ha evolucionado desde vertederos a cielo abierto, hasta los rellenos sanitarios altamente tecnificados donde se controlan las emisiones líquidas (lixiviados) y gaseosas potencialmente peligrosas para el medio ambiente. Tanto en los vertederos a cielo abierto como en los primeros rellenos sanitarios no se controlaban los lixiviados y éstos escurrían a fuentes superficiales de agua o bien se infiltraban a las capas inferiores del terreno y en muchos casos contaminaban los acuíferos subyacentes a ellos. (Méndez *et al*, 2002, Méndez *et al*, 2008).

Un lixiviado se define como: líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contienen en forma disuelta y 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, provocando su deterioro y representa un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos (SEMARNAT, 2003).

En México el volumen estimado de generación de RSU creció alrededor de 28%, entre los años 1997 y 2008, pasando de 29.3 a 37.6 millones de toneladas, de los cuales tan solo el 67% de los RSU generados en el país se dispuso en rellenos sanitarios y sitios controlados y el 33% restante en sitios no controlados, donde la mayoría se encuentra a cielo abierto y realmente es un vertedero. Considerando el tipo de localidad, en las zonas metropolitanas más del 80% de los RSU se dispuso en rellenos sanitarios o sitios controlados, mientras que en las localidades rurales y semiurbanas este porcentaje apenas alcanzó el 3.2%. En cuanto al número de rellenos sanitarios en México, entre 1995 y 2007 la cifra creció de 30 a 114 sitios (SEMARNAT, 2009).

Un relleno sanitario tecnificado, es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar a través de la compactación e infraestructura adicional los impactos ambientales (SEMARNAT, 2003). Se puede explicar con más detalle que el relleno sanitario es un método diseñado para la disposición final de la basura, que consiste en depositar en el suelo los desechos sólidos, los cuales se esparcen y compactan reduciéndolos al menor volumen posible para que así ocupen un área pequeña. Luego se cubren con una capa de tierra y se compactan nuevamente al terminar el día (Ministerio de Salud, 1997). Para construir un relleno sanitario es importante seleccionar el terreno que

reúna condiciones técnicas adecuadas como son: topografía, nivel a que se encuentran las aguas subterráneas y disponibilidad de material para cubrir la basura.

De acuerdo con las características del terreno, el relleno sanitario puede construirse siguiendo los métodos de área, zanja o una combinación de ambos métodos (Ministerio de Salud, 1997).






Método de Zanja o Trinchera.

Se utiliza generalmente en terrenos planos. Se hace una zanja de 2 o 3 metros de profundidad. La basura se deposita dentro, luego se compacta y se va cubriendo con la misma tierra que se sacó de la zanja.





El método de área

Se puede utilizar, tanto en terrenos planos, como para rellenar depresiones y en tajos o canteras abandonados. La tierra utilizada para cubrir la basura debe ser traída de otros sitios como laderas o montañas. La basura se deposita directamente en el suelo, en el caso del terreno plano; o de partes más profundas hacia las más altas, en el caso de las depresiones. La basura se esparce, compactada y recubre diariamente con una capa de 10 a 20 cm, de tierra.

Es importante considerar los principios básicos para el funcionamiento de un relleno sanitario, para ello se debe de contar con:

-  Una buena compactación de los desechos sólidos, antes y después de cubrirlos con tierra.
-  Cubrimiento diario de la basura con una capa de tierra o material similar.
-  Controlar con drenajes y otras técnicas los líquidos o percolados y los gases que produce el relleno, para mantener las mejores condiciones de operación y proteger el ambiente.
-  Evitar por medio de canales y drenajes que el agua de lluvia ingrese al relleno sanitario.
-  Una supervisión constante, tanto de los administradores como de las organizaciones comunales.

A continuación, se indican las ventajas de un relleno sanitario:

-  Un relleno sanitario es un método completo y definitivo para la eliminación de todo tipo de desechos sólidos.
-  Evita los problemas de cenizas y de materiales que no se descomponen.
-  Tiene bajos costos de operación y mantenimiento.
-  Genera empleo para mano de obra no calificada.

- ⊕ Puede ubicarse cerca al área urbana, reduciendo los costos de transporte y facilitando la supervisión por parte de la comunidad.
- ⊕ Permite utilizar terrenos considerados improductivos, convirtiéndolos luego en parque o campos de juegos.

1.2.1 Tratamiento de los lixiviados

Para el tratamiento de los lixiviados se han aplicado diferentes procesos, entre los cuales se tienen:

1.2.1.1 Tratamientos biológicos

Estos pueden ser tanto aerobio como anaerobio (Aziz *et al.*, 2010; Cortez *et al.*, 2010; Bortolotto *et al.*, 2009; Loukidou y Zouboulis, 2001). La degradación biológica se emplea principalmente para eliminar DQO, DBO₅ y amonio, este tratamiento puede ser eficaz para lixiviados jóvenes cuya fracción orgánica se compone principalmente de ácidos grasos volátiles. Sin embargo, cuando el lixiviado tiene alto grado de estabilización generalmente está constituido por sustancias húmicas, que son compuestos refractarios orgánicos de alto peso molecular (Kulikowska y Klimiuk, 2008), éstos no pueden ser tratados adecuadamente por los procesos de degradación biológica, por lo que la combinación de procesos fisicoquímicos es considerada como el tratamiento más apropiado para los lixiviados con alta concentración de compuestos recalcitrantes (Scott y Ollis, 1995), entre los tratamientos propuestos se encuentran los procesos de oxidación avanzada (Silva *et al.*, 2013; Rocha, *et al.*, 2011; Vilar *et al.*, 2011).

1.2.1.2 Tratamiento por procesos de oxidación avanzada

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA), están basados en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. El concepto de los POA, fueron definidos como procesos que involucran la generación de especies oxidantes altamente reactivas capaces de atacar y degradar sustancias orgánicas. Entre los POA más utilizados son, las reacciones Fenton, la Ozonación y la radiación UV, (Bandala *et al.*, 2007), incrementada por la participación de radicales libres (Perkowski *et al.*, 2006).

- ⊕ **Tratamiento mediante un proceso Fenton.** Entre los procesos de oxidación avanzada, se encuentra este proceso que ha demostrado ser efectivo en el tratamiento de lixiviados (Singh y Tang, 2013; Barceló *et al.*, 2011; Cortez *et al.*, 2010; Hermosilla *et al.*, 2009; Deng, 2007), en el cual se trata la carga contaminante con una combinación de Fe²⁺ y H₂O₂, a la cual se le conoce como reactivo Fenton.
- ⊕ **Tratamiento mediante Ozono.** En cuanto al tratamiento con ozono, su poder oxidante es fuerte, donde su eficiencia depende del pH, donde la presencia de radicales libres como OH• y HOO•, son los activos en la oxidación de contaminantes, como fenol, ácido fórmico) donde la reacción con O₃ es muy rápida,

mientras otros reaccionan más lentamente como los ácidos húmicos, así como varios plaguicidas

⊕ **Tratamiento por radiación UV.** Finalmente, el tratamiento utilizando radiación UV en presencia de H_2O_2 , según Primo, (2008) y García-Molina, (2006), se basa en la formación de radicales hidroxilos a partir de la fotólisis del peróxido de hidrógeno y la formación de los radicales tiene lugar a causa de los fotones incidentes absorbidos utilizando lámparas con un rango de emisión comprendido entre 180 y 400 nm, o monocromáticas (254 nm), más específicas para obtener un mayor rendimiento en la fotólisis del peróxido.

⊕ **Tratamientos combinados.** Se puede considerar un tratamiento combinando los tres procesos. Al tratar un lixiviado primero por el proceso Fenton aún posee altas concentraciones de materia orgánica y sustancias recalcitrantes para poder tratarse por ejemplo por medios biológicos, por lo que antes de su disposición en cuerpos de agua requiere complementarse además con otro tratamiento, que puede por ozonólisis y ya poder completarse por algún medio biológico o por adsorción con algún soporte, como el carbón activado (May, 2010, Zamora, 2014) o mejor aún por radiaciones UV (Millán et al., 2015; Morales 2013, Wright y Cairns, 2005), que incluso puede ser menos costoso y más rápido, además de poder ser un proceso de pulimento.

1.2.2 Características de lixiviados

Los lixiviados presentan diferentes concentraciones de sus constituyentes en cada relleno sanitario, ya que la cantidad y la calidad de los residuos dependen del tipo de población, estilo de vida, hábitos alimenticios, tipo de industria, zona comercial, tradición cultural de los habitantes y clima. Kiss (2006) y Méndez *et al.* (2002), encontraron que la generación de lixiviados en los rellenos sanitarios es afectada por muchos factores, entre los que se encuentran: el grado de compactación de los desechos, tipo de material de cubierta de las celdas, asimismo la: precipitación pluvial, humedad atmosférica, temperatura, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y capacidad de campo del relleno. Según Durán et al, (2008), el grado de estabilización de los residuos tiene efecto en la composición de los lixiviados. Obuli y Kurian, (2007); Kiss *et al.*, (2006); Tchobanoglous *et al.*, (1994), consideraron que las fases en la descomposición de los RSU en los rellenos sanitarios están relacionadas con la edad de los lixiviados. Amokrane *et al.*, (1997), realizó una clasificación de los lixiviados basándose en sus características de pH, DQO, COT, DBO y ácidos grasos volátiles (VFA) y de la edad, en jóvenes (menos de 5 años), medios (de 5 a 10 años) y viejos o estabilizados (mayores de 10 años).

En la parte del norte de Alemania Occidental durante un período medio de 3 años, Ehrig, (1983), estudió y obtuvo resultados de lixiviados midiendo 20 rellenos sanitarios. El caudal de lixiviado pudo ser estimado como un porcentaje de precipitación anual considerando al año de 501 a 1057 mm de precipitación. Los valores para la consolidación con tractores

orugas fueron entre el 25 al 50 % y con compactadores de ruedas de acero, del 15 al 25 %. El contenido orgánico del lixiviado fue dependiente de la clase de condiciones de descomposición. La producción de acético, ácidos grasos volátiles producidos en el lixiviado tuvieron un alto valor de DQO y DBO₅. En la siguiente etapa de degradación, estos ácidos fueron convertidos a CO₂ y CH₄, por lo que el contenido orgánico del lixiviado disminuyó notablemente. Las concentraciones de algunos componentes inorgánicos, como Fe y Ca, fueron paralelas como consecuencia del cambio del pH. El amoníaco mostró un aumento lento con la edad del relleno sanitario.

Capítulo 2

Justificación, Objetivos y Diagrama del proyecto

Justificación, Objetivos y Diagrama del proyecto

2.1 Justificación

Uno de los problemas en el manejo de residuos, es la producción de lixiviados por su contenido de componentes orgánicos, su toxicidad, su corrosividad y su difícil degradación. Por ello es importante establecer algún tratamiento para este tipo de sustancias, que sea de fácil aplicación y, hasta cierto punto, económico. La difícil degradación, sobre todo de lixiviados estabilizados, puede ser mediante **tratamientos de oxidación combinados**, como la reacción de Fenton como primera opción donde se degradarían un buen número de componentes orgánicos, seguida por un tratamiento con ozono para destruir las especies residuales del tratamiento por Fenton y finalmente para asegurar una completa degradación se utilizaría la radiación UV como pulimento, ya que el problema de las lagunas de lixiviados en México es que se mezclan lixiviados de todas las edades.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

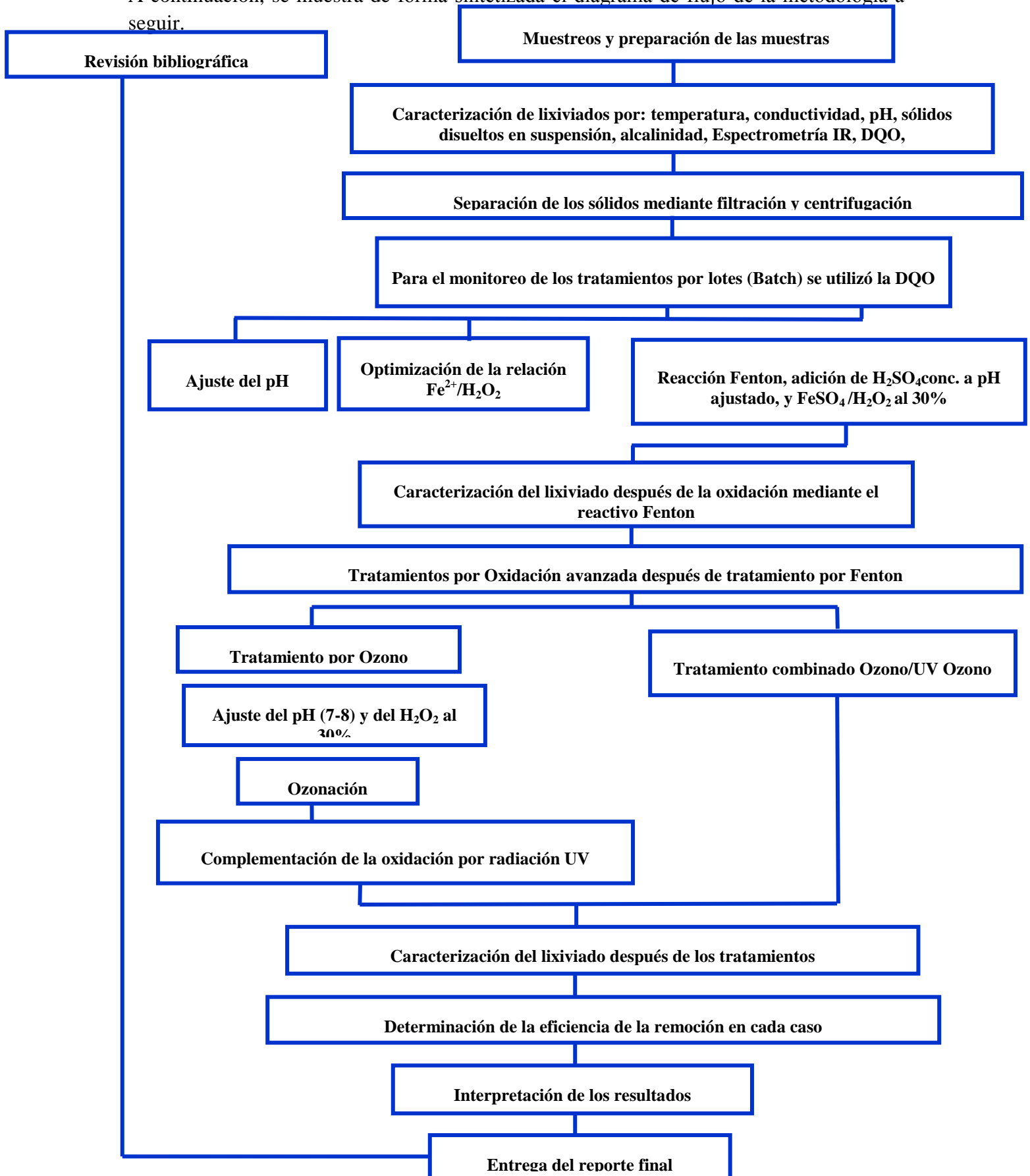
Optimizar un proceso de tratamiento de un lixiviado proveniente del relleno sanitario del Centro Ecológico de manejo Integral de Residuos Querétaro (CEMIRQ) mediante una oxidación avanzada Fenton y posterior tratamiento con ozonólisis y UV como pulimento.

2.2.2 Objetivos Específicos

- **DETERMINAR** las características de los lixiviados para establecer su edad y los compuestos más importantes en función del grado de estabilización a través de la demanda química de oxígeno (DQO) y espectrometría infrarroja (IR).
- **EVALUAR** el tratamiento de. Lixiviados mediante una oxidación avanzada utilizando la reacción de Fenton.
- **EVALUAR** posteriormente un tratamiento por Ozonación para continuar la degradación del material que no se completó por la reacción Fenton.
- **EVALUAR** un tercer tratamiento mediante radiación UV como pulimento para completar la degradación del material proveniente de las reacciones anteriores.
- **DETERMINAR** la eficiencia de cada tratamiento utilizando como parámetro principal de seguimiento la DQO y los resultados de los análisis por IR.

2.2.3 Diagrama del proyecto

A continuación, se muestra de forma sintetizada el diagrama de flujo de la metodología a seguir.



Capítulo 3

Marco teórico

Marco teórico

3.1 Concepto de relleno sanitario

Un relleno sanitario se utiliza para la disposición final de los residuos sólidos urbanos, con el fin de controlar a través de la compactación e infraestructura adicional los impactos ambientales (SEMARNAT, 2003); evitar la contaminación es el factor principal de los rellenos sanitarios, por lo que se deben de tomar en cuenta todas las medidas y estudios de control, ya que la contaminación representa riesgos para la salud de los seres humanos y del ambiente (Ullca, 2006).

En relación con la disposición final de residuos sólidos municipales (RSM), se podría proponer tres tipos de rellenos sanitarios:

3.1.1 Relleno sanitario mecanizado

El relleno sanitario mecanizado es aquel diseñado para las grandes ciudades y poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias. Por sus exigencias es un proyecto de ingeniería bastante complejo, que va más allá de operar con equipo pesado. Esto último está relacionado con la cantidad y el tipo de residuos, la planificación, la selección del sitio, la extensión del terreno, el diseño y la ejecución del relleno, y la infraestructura requerida, tanto para recibir los residuos como para el control de las operaciones, el monto y manejo de las inversiones y los gastos de operación y mantenimiento.

Para operar este tipo de relleno sanitario se requiere del uso de un compactador de residuos sólidos, así como equipo especializado para el movimiento de tierra: tractor de oruga, retroexcavadora, cargador, volquete, etc.

3.1.2 Relleno sanitario semimecanizado

Cuando la población genere o tenga que disponer entre 16 y 40 toneladas diarias de RSM en el relleno sanitario, es conveniente usar maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual, a fin de hacer una buena compactación de la basura, estabilizar los terraplenes y dar mayor vida útil al relleno. En estos casos, el tractor agrícola adaptado con una hoja topadora o cuchilla y con un cucharón o rodillo para la compactación puede ser un equipo apropiado para operar este relleno al que podríamos llamar semimecanizado.

Se puede afirmar que es necesario el empleo de equipos de movimiento de tierras (tractores de orugas o retroexcavadoras) en forma permanente cuando al relleno sanitario se llevan más de 40 t/día de RSM. En la región, esto equivale por lo general a poblaciones mayores de 40.000 habitantes. Por su versatilidad, el tractor agrícola puede servir para prestar o apoyar el servicio de recolección de basura si de preferencia se le engancha un remolque con volteo hidráulico de unos 6 a 8 metros cúbicos de capacidad o bien una caja compactadora, dependiendo de las necesidades y recursos de la localidad. Ocasionalmente,

este mismo equipo podrá emplearse en la realización de algunas obras públicas en el municipio, con lo que se aprovecharía al máximo la inversión realizada.

3.1.3 Relleno sanitario manual

Es una adaptación del concepto de relleno sanitario para las pequeñas poblaciones que por la cantidad y el tipo de residuos que producen menos de 15 t/día, además de sus condiciones económicas, no están en capacidad de adquirir el equipo pesado debido a sus altos costos de operación y mantenimiento. El término manual se refiere a que la operación de compactación y confinamiento de los residuos puede ser ejecutado con el empleo de algunas herramientas.

3.2 Las medidas y estudios que se deben realizar para un relleno sanitario

3.2.1 Estudio detallado del impacto ambiental, económico y social

Debe incluir desde la planeación y selección del sitio hasta la vigilancia y monitoreo del sitio en toda la vida del vertedero y después de clausurado. El relleno sanitario debe compactar la basura lo más que se pueda y después cubrirla con una capa de tierra y otros materiales y así consecutivamente colocar otra capa de basura, hasta que el relleno sanitario quede completo. Este es un procedimiento de ingeniería para la disposición de los residuos sólidos en el suelo, de modo que se le dé protección al medioambiente (Delleur, 1998). Para ello se señalan los diferentes tipos de rellenos:

- ⊕ Con o sin trituración,
- ⊕ Con o sin recirculación de lixiviados, y
- ⊕ Con o sin selección previa.

3.2.2 Ventajas

Algunas ventajas para considerar sobre los rellenos sanitarios son:

- ⊕ Bajo costo inicial, de operación y de mantenimiento.
- ⊕ Aprovechamiento de terrenos que hayan sido considerados improductivos o marginales, tomándolos útiles para la construcción de un parque, área recreativa, campo deportivo, etc.
- ⊕ Solucionar el problema, completo y definitivo, a números municipios importantes que se ven todavía abrumados por numerosos costos, humos, olores, plagas, molestias públicas que se generan con otros métodos de eliminación de basura.
- ⊕ Un relleno sanitario puede empezar a trabajar en poco tiempo como método de eliminación.

- ⊕ Se considera flexible, ya que no preciso de instalaciones fijas, y también debido a que está apto para recibir mayores cantidades adicionales de desechos con poco incremento de personal.

3.2.3 Desventajas

Algunas desventajas para considerar sobre los rellenos sanitarios son:

- ⊕ Debe tener una buena planificación sobre todo con una buena concientización del ciudadano, para adoptar medidas pertinentes y evitar la contaminación del suelo, aire y agua. Se puede presentar una eventual contaminación de aguas subterráneas y superficiales cercanas, si no se toman las debidas precauciones.
- ⊕ Obstrucciones en las tendencias del crecimiento de la población (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

3.3 Importancia de la selección del sitio y del diseño de un relleno sanitario

Un paso importante en la construcción de un relleno sanitario es hallar el lugar geográfico, para ello se requiere un trabajo minucioso la en investigación de terrenos que resulten, en una primera instancia, satisfactorios y luego seleccionar el más adecuado. Es probable que se encuentre más de un área disponible que reúna varias de las características detalladas a continuación, por lo que el proyectista debe clasificarlas teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes de cada una, realizando un orden de preferencia. El terreno debe estar cerca de una vía principal, de ser posible pavimentada, que permita acceder al sitio donde se descarga la basura en forma rápida. Además, se debe garantizar el acceso al relleno por vías transitables durante todas las estaciones del año. En la misma cita se describe otro aspecto de interés para la selección del sitio, que es la evaluación de las condiciones hidrogeológicas. Un estudio geológico permite determinar la permeabilidad del suelo. El ideal para un relleno sanitario es aquel cuyo coeficiente de permeabilidad, K , es del orden de 10^{-7} cm/s. Es necesario evaluar también la profundidad del manto freático o aguas subterráneas. La distancia al fondo del relleno no debe ser inferior a los dos metros. El terreno debe ofrecer material de cobertura en cantidad y calidad adecuada y que sea fácil de extraer. Si el suelo no fuera adecuado o no se pudiera excavar, deberán preverse yacimientos para cobertura en lugares próximos y accesibles. La ubicación del sitio debe seleccionarse de forma que los vientos predominantes soplen desde la zona urbana hacia él. Los datos de las precipitaciones promedio serán útiles para estimar su influencia en la producción de lixiviado dado que la generación de este está íntimamente ligado a las condiciones climáticas. También deberán tenerse en cuenta los aspectos legales.

3.3.1 Planificación y diseño

Cuando ya se ha seleccionado el sitio de emplazamiento del relleno sanitario se requiere efectuar una serie de estudios a fin de reunir los datos necesarios para la planificación del proyecto. Estos estudios pueden basarse en datos estadísticos que faciliten información sobre cantidad de habitantes, tasa de crecimiento demográfico, distribución demográfica, actividades principales que se desarrollan en la zona, tipo de basura a disponer, potencial producción de residuos que no deben ingresar al relleno sanitario, etc. Además, deberán recopilarse datos climáticos como intensidad y dirección de vientos predominantes, pluviometría, temperaturas medias y extremas. Estas evaluaciones deben realizarse en la fase de planificación y diseño con el objetivo de asegurar que el proyecto sea ambientalmente adecuado y sustentable, facilitando su mejora desde el punto de vista ambiental, al mismo tiempo que se minimizan, atenúan o compensan los impactos negativos. Deben considerarse al menos tres etapas: la preparación de la infraestructura, la operación y el post-cierre y control del área (SEMARNAT, 2003).

3.3.2 Construcción del Relleno Sanitario

La construcción del módulo del relleno sanitario tecnificado (Figura 3.1) puede llevarse a cabo mediante uno de los siguientes métodos: de Área o del de Trinchera. La selección del método constructivo depende del tipo de suelo en el que se va a trabajar.



Figura 3.1. Construcción de un relleno sanitario tecnificado.

- ✚ El método de área es práctico para aquellos terrenos en los que resulta imposible realizar excavaciones, ya sea por la profundidad de las napas de agua o por las características del suelo que hagan que el mismo no pueda excavarse. Debe contarse con depresiones naturales que sean factibles de ser rellenadas.
- ✚ El método de trinchera se emplea cuando las características estratigráficas del suelo y la profundidad de las napas de agua permitan realizar excavaciones. En este caso se deberá en primer lugar desmontar el sitio retirando la capa vegetal y luego excavar para extraer el volumen de suelo necesario. Esta excavación debe llegar a

una distancia no menor al metro y medio a las napas de aguas. Uno de los aspectos más importantes en la construcción es la adecuada impermeabilización del fondo del módulo. Esta impermeabilización puede garantizarse naturalmente, o proveerse de modo artificial. Naturalmente puede lograrse mediante la utilización de arcillas, las que constituyen un buen material para la construcción de un sello de fondo en un relleno sanitario. En la impermeabilización artificial se utilizan membranas de polietileno de alta densidad, polivinil clorado o policloruro de vinilo (PVC), polietileno clorosulfurado o geomembranas de 800 micrones, existiendo actualmente en el mercado una amplia gama de productos que satisfacen las necesidades requeridas (Tchobanoglous et al, 1994).

3.4 Concepto de Lixiviados

3.4.1 Definición de Lixiviado

Un Lixiviado se define como: líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contienen en forma disuelta y 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, provocando su deterioro y representa un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos (SEMARNAT, 2003).

3.4.2 Características de los lixiviados

El grado de estabilización de los residuos, tienen un efecto en la composición de los lixiviados (Durán *et al.*, 2002), los lixiviados se pueden clasificar en lixiviados jóvenes, intermedios y estabilizados.

3.4.2.1 Los lixiviados jóvenes

Presentan una carga orgánica alta ($DQO > 20 \text{ g O}_2/\text{L}$), concentración de ácidos carboxílicos aproximada del 80% de la carga orgánica, materia orgánica rápidamente biodegradable ($DBO/DQO=0.3$), una relación de $COT/DQO=0.3$, pH alrededor de 6.5, concentración de metales de 2 g/L , preponderancia de ácidos grasos volátiles (AGV) y compuestos de alto peso molecular.

3.4.2.2 Los lixiviados intermedios

Muestran una carga orgánica entre $3 \text{ a } 15 \text{ g O}_2/\text{L}$, concentración de ácidos carboxílicos que representan del 20 al 30% de la carga orgánica, la relación $DBO/DQO=0.2$, un pH casi neutro, compuestos de peso molecular superior a 500 g/mol (Mertens *et al.*, 1995).

3.4.2.3 Los lixiviados estabilizados

Tienen una carga orgánica $< 2 \text{ gO}_2/\text{L}$, ausencia de ácidos carboxílicos, baja biodegradabilidad $DBO/DQO = 0.1$, $COT/DQO = 0.4$ indicando la presencia de compuestos difícilmente oxidables, presencia de compuestos de elevado peso molecular

superior a 5000 g/mol, pH superior a 8 y concentración de metales menor de 50 mg/L (Ehrig, 1983, Ehrig, 1984).

3.5 Descomposición de la materia orgánica

Tchobanoglous *et al.*, (1994), Kiss *et al.*, (2006), Obuli y Kurgan (2007), consideraron cinco las fases en la descomposición de materia orgánica en los rellenos sanitarios, que están relacionados con la edad de estos. Estas fases se indican en la figura 3.2.

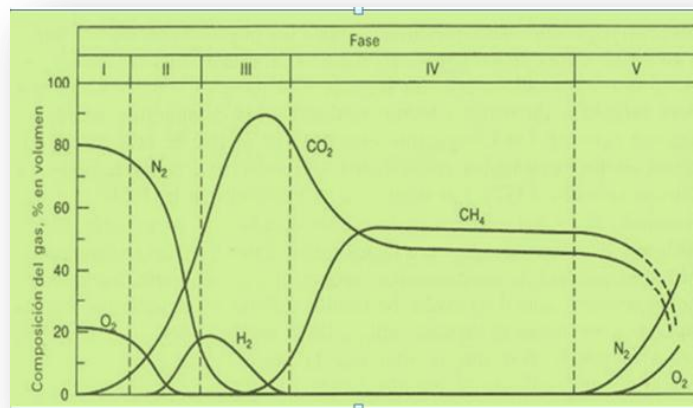


Figura 3.2. Fases generales en la generación de gases de efecto invernadero.

3.5.1 Fase I: Ajuste inicial.

Es la fase en la cual los componentes orgánicos biodegradables de los RSU's sufren descomposición microbiana bajo condiciones aerobias, por la cantidad de aire atrapado dentro del vertedero.

3.5.2 Fase II: Fase de transición.

Donde se reduce el oxígeno y comienzan a desarrollarse las condiciones anaerobias. El vertedero se convierte en anaerobio (Tchobanoglous *et al.*, 1994). Fase importante donde se inicia la conversión orgánica de los RSU's en metano y dióxido de carbono en un proceso de tres pasos (figura 3.3).

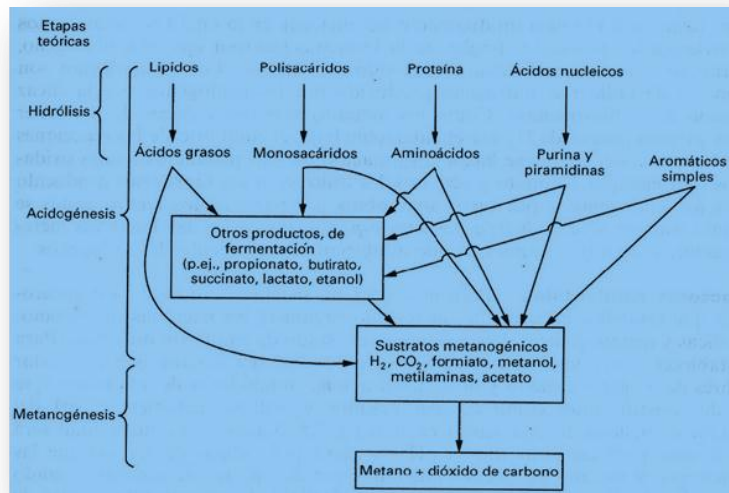


Figura 3.3. Ruta de producción de metano y dióxido de carbono.

El material orgánico complejo se convierte en ácidos y otros productos intermedios.

3.5.3 Fase III: Fase ácida.

Durante esta fase se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II, con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de hidrógeno. El primer paso implica la transformación, mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular (por ejemplo, lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos, como fuentes de energía y de carbono celular. El segundo paso (acidogénesis) implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso, en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético (CH_3COOH) y las pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono (CO_2) es el principal gas generado durante la fase III, aunque también se producen cantidades más pequeñas de hidrógeno (H_2). Los microorganismos implicados en esta conversión, llamados colectivamente no metanogénicos, son bacterias anaerobias (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

3.5.4 Fase IV: Fase de fermentación del metano

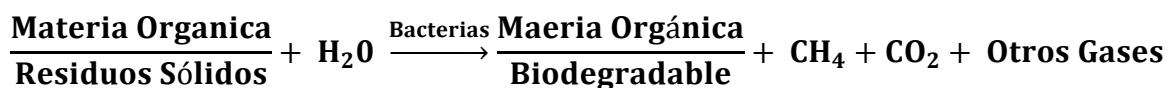
En esta fase predomina un segundo grupo de microorganismos, que convierten el ácido acético y el hidrógeno (producidos en la fase ácida) en CH_4 y CO_2 . En algunos casos, estos organismos comenzarán a desarrollarse hacia el final de la fase III. Los microorganismos responsables de esta conversión son estrictamente anaerobios y se llaman metanogénicos. Colectivamente, se identifican en la literatura como metanogénicos o formadores de metano. En la fase IV la formación de metano y ácido se produce simultáneamente, aunque

la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

3.5.5 Fase V: Fase de maduración

Se produce después de convertirse el material inorgánico biodegradable en CH₄ y CO₂ durante la fase IV. Mientras la humedad sigue migrando a través de los residuos, porciones del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles se van convirtiendo. Durante la fase V la velocidad de generación del gas de vertedero, disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado en las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el vertedero son de una degradación lenta. Los principales gases de vertedero que han evolucionado en la fase V son CH₄ y CO₂. Según las medidas de sellado del relleno sanitario, también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el gas. Estas condiciones ocurren por lo regular en rellenos recién clausurados, la producción de metano decrece y el bióxido de carbono es sustituido por el nitrógeno y oxígeno conforme se introduce el aire atmosférico a través de la capa superior del relleno (Kiss *et al.*, 2006).

La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la forma siguiente:



La cantidad y la calidad de los RSU depende de varios factores tales como la población, estilo de vida, hábitos alimenticios, tipo de industria, zona comercial, tradición cultural de los habitantes y el clima (Kiss *et al.*, 2006). Por estas razones los lixiviados tienen diferentes concentraciones en cada relleno sanitario. La generación de lixiviados en los rellenos sanitarios depende de muchos factores, entre los que se encuentran el grado de compactación de los desechos, el grado de humedad inicial de la basura, el tipo de material de cubierta de las celdas, la precipitación pluvial, humedad atmosférica, temperatura, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y la capacidad de campo del relleno. La composición de los lixiviados depende del tipo de desecho confinado, del nivel de degradación de los residuos y del volumen producido (Méndez *et al.*, 2002, Kiss *et al.*, 2006). Un aspecto importante de los rellenos sanitarios es la obtención de metano a partir de biogás, actualmente existen tecnologías empleadas para optimizar y hacer eficiente el proceso (Kiss *et al.*, 2006).

Se construye en el fondo del módulo o celda un sistema de drenajes que permite coleccionar el líquido (lixiviado que produce la basura al descomponerse) en lagunas construidas para darles un tratamiento, como es el caso de la laguna de lixiviados del Centro de Manejo Integral de Residuos Querétaro (CEMIRQ) situado en el Estado de Querétaro (Figura 3.4).



a) Perspectiva desde el punto 4

b) Perspectiva desde el punto 1

c) Perspectiva desde el punto 3

Figura 3.4. Diferentes vistas de la Laguna de Lixiviados.

Se realiza la excavación de las zanjas, ver figura 3.1, que una vez impermeabilizada el área donde se va a trabajar, se colocan tubos de polietileno de alta densidad perforados que se rodean de piedra caliza o canto rodado para evitar que se obstruyan los orificios de entrada con basura. Las lagunas se construyen en la parte más baja del relleno sanitario de modo de garantizar un correcto escurrimiento del lixiviado hacia ellas (Tchobanoglous *et al*, 1994).

El proceso de descomposición también genera gases que tienden a acumularse dentro del relleno en los espacios vacíos. Entre los gases generados se encuentran el metano, el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono. El metano es inflamable en determinadas concentraciones; si se acumula en algunos puntos del relleno existe peligro de explosión, por lo cual debe ser correctamente venteado (Figura 3.5).



Figura 3.5. Chimenea para quemar biogás.

Este sistema de ventilación se construye con tubos perforados de concreto o PVC con un diámetro entre 10 y 30 cm que se revisten con piedra y se envuelven con mallas de alambre tejido o alambres de púa (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

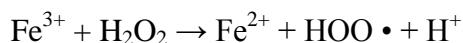
3.6 Tratamientos de lixiviados por oxidación avanzada

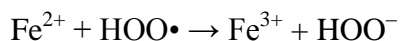
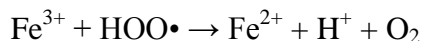
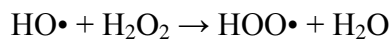
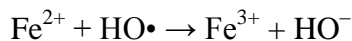
Los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO's) se encuentran incluidos dentro de los procesos de oxidación química más efectivos para el tratamiento de agua. Estas tecnologías están basadas en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. El concepto de los PAO's fue definido como procesos que involucran la generación de especies oxidantes altamente reactivas capaces de atacar y degradar sustancias orgánicas. Se ha sugerido que su alta eficiencia es debida a su viabilidad termodinámica y a una velocidad de reacción incrementada por la participación de radicales libres (Bandala *et al.*, 2007).

3.6.1 Reactivo Fenton

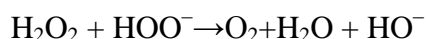
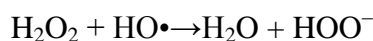
H.J.H Fenton descubrió en 1894 que varios metales tienen características especiales en la transferencia del oxígeno que mejoren el uso del peróxido de hidrógeno. Realmente, algunos metales tienen una energía catalítica fuerte para generar los radicales oxhidrilos (HO•) altamente oxidantes. A partir de este descubrimiento, el peróxido de hidrógeno catalizado con hierro se llama: reacción de Fenton. Hoy en día, la reacción de Fenton se utiliza para tratar una gran variedad de contaminantes tal como fenoles, formaldehído, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX), plaguicidas, productos químicos de la industria de las gomas en el agua, etc. (Perkowski *et al.*, 2006). El reactivo de Fenton puede ser clasificado como una variante de un tratamiento avanzado primario, compuesto por un proceso de coagulación-floculación con una etapa de oxidación avanzada. Esta reacción comenzó a ser utilizada a finales de 1960 para el tratamiento de compuestos orgánicos no biodegradables o recalcitrantes. Este proceso ha demostrado su eficiencia en el tratamiento de muchos desechos peligrosos líquidos, como los lixiviados (Méndez *et al.*, 2002, Durán-Moreno *et al.*, 2003, Bódalo *et al.*, 2007).

La oxidación mediante el reactivo Fenton se trata de un sistema catalítico homogéneo en el cual una sal de hierro, que puede ser FeSO₄ o FeCl₂, genera radicales HO• por la interacción del peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con Fe (II). Este radical al interactuar con el H₂O₂ forma el ion peroxilo (HO₂⁻) que a su vez reacciona con más peróxido de hidrógeno dando oxígeno, agua y el ion hidróxido. De Laat y Gallard (Parsons, 2004) y posterior Barbusinski (2009), propusieron las siguientes reacciones:

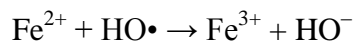




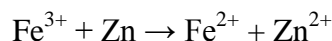
Este conjunto de reacciones produce oxidantes fuertes:



Por otro lado, la interacción del ion Fe^{2+} *in situ* con los radicales hidroxilos ($\text{HO}\cdot$) donde éstos intervienen en la oxidación directa del hierro da la siguiente reacción:



La regeneración de la forma reducida se logra mediante la reducción con un agente reductor como la granalla de zinc:



La velocidad de generación de radicales está determinada por la reacción del Fe (II) con el peróxido de hidrógeno, por lo que la concentración de hierro limita la velocidad de oxidación (Perkowski *et al.*, 2006, Rodríguez *et al.*, 2006). Típicamente, las relaciones Fe:H₂O₂ están en el intervalo 1-10%, ya que, para cargas de catalizador menores, la velocidad de reacción es demasiado baja. Otra incidencia relacionada con el sistema Fenton es la posibilidad de que los productos de reacción (ácidos orgánicos) secuestren el hierro sacándolo del ciclo catalítico. El rango de aplicabilidad de la técnica está limitado también por el pH del medio. El pH óptimo se sitúa en el intervalo 3-6 y la pérdida de eficacia en medio básico, se relaciona con la transición del hierro de la forma ferrosa hidratada a especies férricas coloidales, bajo las cuales el hierro descompone el peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua, pero sin promover la formación de radicales. Actualmente se investiga la posibilidad de extender el pH; pero no existen aplicaciones comerciales para medio básico. A pH < 3, la reducción de la eficacia es menor, pero afecta considerablemente a la economía del proceso y en el caso de soluciones concentradas, forzar a controlar el pH de forma permanente con el consiguiente costo de reactivos, puesto que el medio tiende a acidificarse con el transcurso de la reacción. El reactivo de Fenton es eficaz esencialmente como pre-tratamiento cuando la carga orgánica del residuo a tratar es superior a los 500 mg/L de DQO. En soluciones más diluidas, la selectividad disminuye en el efluente pre-tratado, los compuestos orgánicos se transforman en fragmentos ácidos particularmente adecuados para un biotratamiento o por adsorción (Rodríguez *et al.*, 2006). Los grados de

reducción de la DQO han alcanzado el 97 % con respecto al valor iniciales (Perkowski *et al.*, 2006).

3.6.2 Tratamiento mediante reacción de Ozono

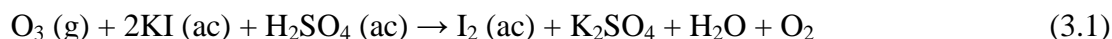
En 1781 Martines van Manus descubrió el ozono, trabajando con máquinas que producían chispas eléctricas, aunque fue Schönbein en 1867 quien caracterizó la molécula como O₃, muchas de sus propiedades físicas y químicas y le dio nombre. En la naturaleza las tormentas eléctricas ionizan el aire produciendo compuestos de nitrógeno, principalmente óxido nítrico NO, además de ozono. Por semejanza al fenómeno natural, los generadores comerciales de ozono continúan utilizando descargas eléctricas silentes (de barrera dieléctrica). Los aparatos modernos aplican el efecto “corona”, consistente en la ionización que sufren los gases situados alrededor de un conductor cargado a un potencial elevado, 4 o más kV. (Solís-Correa, 2011)

El ozono (O₃) difiere marcadamente del oxígeno (O₂) en lo que respecta a su reactividad. Aunque el oxígeno se combina prácticamente con todos los elementos, lo hace frecuentemente a altas temperaturas, mientras que el ozono se comporta como un poderoso agente oxidante reaccionando con numerosas sustancias en condiciones el oxígeno es inactivo. En la tabla 3.1 se presentan las propiedades del ozono.

Tabla 3.1. Características y propiedades del Ozono

| Características | Propiedades |
|--|--|
| Fórmula | O ₃ |
| Estructura | |
| Estado físico | Gas a temperatura ambiente, color: azul pálido |
| Peso molecular | 47.998 g/mol |
| Densidad en estado líquido | 2.14 g/mL |
| Temperatura de fusión en estado sólido | 80.7 K, -192.45 °C |
| Temperatura de ebullición | 161 °K, -112.15 °C |
| Constante de solubilidad de Henry (K_H) | 1.05 g/L a 1 atmósfera y 0 °C |

La reacción de ozono con yoduro de potasio es rápida y cuantitativa y se puede utilizar para la determinación analítica del ozono.

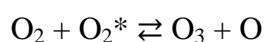
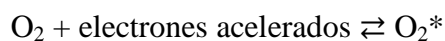


Los siguientes potenciales ilustran las diferencias entre las propiedades oxidantes del ozono y del oxígeno, (Solís-Correa, 2011):



Como método tiene algunos beneficios, por ejemplo, el no dejar residuos porque el producto principal de su degradación es el oxígeno molecular ($2\text{O}_3 \rightleftharpoons 3\text{O}_2$) y, por ser un oxidante muy fuerte, casi cualquier molécula orgánica resulta convertida en CO_2 , agua y los productos de oxidación de los otros elementos. Normalmente la producción de ozono ocurre en aire o en oxígeno secos. Se usa con frecuencia las descargas eléctricas (llamadas “silentes”) y también se usa el efecto “corona”. Éste consiste en que un conductor a alto voltaje es capaz de emitir electrones acelerados que al impactar sobre los gases que los rodean, “activan” a las moléculas y las especies activas reaccionan con las moléculas vecinas (Solís-Correa, 2010).

En atmósfera de oxígeno se dan las reacciones:

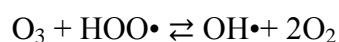
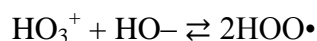
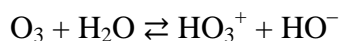


El ozono así formado se puede denominar “*ex situ*”, significando que el reactor en el que se produce el ozono es diferente del reactor en el que se consume. En medio ácido el poder oxidante del ozono es superado solamente por la molécula de flúor, el ion perxenato, el oxígeno atómico, los radicales libres hidroxilo $\text{HO}\cdot$ y algunas especies de este tipo. La velocidad de descomposición del ozono disminuye notablemente en medio alcalino (Cotton *et al.*, 1999). Sin embargo, en solución acuosa hay otros agentes como son los radicales libres $\text{HO}\cdot$ y $\text{HO}_2\cdot$, cuya eficiencia no depende de la basicidad del medio. Von Gunten (2003), muestra que estos radicales son más activos cuando el pH de la solución de trabajo es mayor que 8. Algunos compuestos orgánicos reaccionan con ozono muy rápidamente hasta la mineralización, dentro de minutos o aún segundos (fenol, ácido fórmico), mientras otros reaccionan más lentamente (ácidos de humectación y húmicos, varios plaguicidas, tricloroetano etc.). En algunos casos, los materiales orgánicos son oxidados solamente en forma parcial con ozono. Una ventaja principal de la oxidación parcial de materiales orgánicos es que al oxidarse parcialmente se polarizan mucho más que el o los originales

produciendo materiales insolubles complejos que se pueden eliminar con filtros de carbón activado.

El ozono (O₃) es un agente oxidante muy fuerte, al alimentarse con este un medio acuoso en el que se encuentran los productos orgánicos a degradar, presentan lo siguiente.

- Principalmente en medio ácido el poder oxidante del ozono es muy fuerte, la velocidad de descomposición del ozono disminuye notablemente en medio alcalino. Sin embargo, en solución acuosa hay otros agentes como son los radicales libres OH• y HOO•, cuya eficiencia no depende de la basicidad del medio. Von Gunten, (2003), muestra que estos radicales son más activos cuando el pH de la solución de trabajo es mayor que 8.
- El ozono con el agua para dar las reacciones propuestas por Kogelschatz y Eliasson (1995):



3.6.3 Reacción con UV

La luz ultravioleta (UV) es una alternativa establecida y cada vez más popular frente al uso de productos químicos para la desinfección de agua potable, aguas residuales y aguas industriales de varias calidades. Los sistemas de desinfección UV pueden ser diseñados para una amplia gama de aplicaciones siempre que se preste la debida atención a la calidad del agua que se está desinfectando y a los objetivos de desinfección buscados. En la tabla 3.2 muestra una lista de aplicaciones específicas de la desinfección UV.

Tabla 3.2. Aplicaciones de la desinfección UV.

| Aplicaciones | Sitios | |
|--------------|----------------------|---|
| Agua Potable | Municipal Comunal | Campos de casas rodantes Terrenos para acampar Restaurantes Alojamientos de caza Campos de esquí Hoteles Barcos |

| Aplicaciones | Sitios | |
|-------------------------|--|--|
| | Institucional | Hospitales Escuelas Asilos de ancianos Centros Comunales Residencias |
| Aguas Residuales | Municipales Comunales Institucionales Residenciales | |
| Comercial | Criaderos de Peces Hidrocultivos Laboratorios Acuarios Restaurantes | |
| Industrial | Cervecerías Farmacéutica Institucional Embotelladoras Electrónica Escuelas Conservas Productos Lácteos Alimentos Productos marinos Destilerías Petróleo Textiles Comunales Cosméticos Imprenta | |

Se han publicado perspectivas históricas de la desinfección UV en varios artículos (Grocock, 1984; Schenck, 1981; USEPA, 1996). En 1878, Downs y Blunt reportaron por primera vez los efectos germicidas de la energía radiante del sol. Sin embargo, las aplicaciones prácticas requirieron el desarrollo de la lámpara de vapor de mercurio como fuente de luz UV artificial en 1901 y el reconocimiento del cuarzo como la envoltura ideal de lámpara en 1905. Los primeros intentos experimentales para usar UV como desinfectante del agua se llevaron a cabo en Marsella, Francia, en 1910. Entre 1916 y 1926, se usó UV en los Estados Unidos para la desinfección del agua y para proveer agua potable en los barcos. Sin embargo, el bajo costo de la desinfección del agua con cloro, además de los problemas operativos y de confiabilidad observados en los primeros equipos de desinfección UV, retardaron el crecimiento de las aplicaciones de UV hasta la década de los 50. (Wright y Cairns, 2005)

En 1955, se pusieron en funcionamiento instalaciones prácticas de desinfección UV para agua potable en Suiza y Austria. En 1985, el número de instalaciones en dichos países había aumentado a 500 y 600 respectivamente. Con el descubrimiento de los subproductos de la cloración, la desinfección UV se hizo popular en Noruega, poniéndose en funcionamiento la primera instalación en 1975. La primera instalación en Holanda se puso en funcionamiento en 1980. Hoy en día existen más de 2.000 instalaciones en Europa que usan UV para desinfectar agua potable y más de 1.000 instalaciones en los Estados Unidos (USEPA, 1996). La desinfección UV es popular en Nueva York donde se le usa para desinfectar más de 6,4% de todos los sistemas de aguas subterráneas. Similarmente se reportó que 761 de los 10.700 sistemas públicos de abastecimiento de agua en Pensilvania usan UV sola o en combinación con cloro. En el Reino Unido, la desinfección UV mediante el uso de tecnologías de lámparas de baja y mediana presión se ha combinado con el uso del cloro en una planta de tratamiento de agua de 14.5 mgd en Londres para la desinfección primaria y el mantenimiento de un residual. (Wolfe, 1990)

La luz ultravioleta es la porción del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible (Figura 3.6).

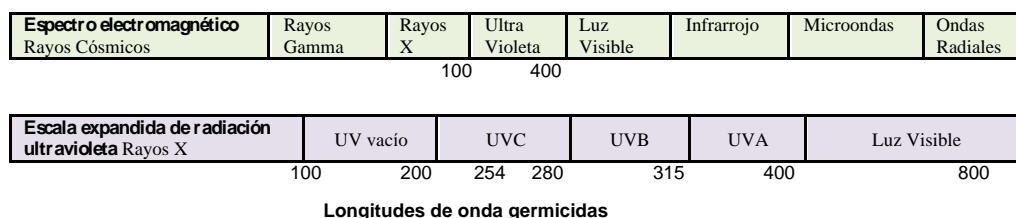


Figura 3.6. Regiones del espectro electromagnético y de la Luz UV.

Se han definido cuatro regiones del espectro UV- vacío UV entre 100 y 200nm, UVC entre 200 y 280nm, UVB entre 280 y 315nm, y UVA entre 315 y 400nm (Meulemans, 1986). La aplicación práctica de la desinfección UV se basa en la capacidad germicida de UVC y UVB. La luz UV es la radiación electromagnética con longitud de onda más corta que la

luz visible y más larga que los rayos X; se divide en UV-Cercano (380-200 nm), UV-Lejano (200-10 nm) y UV-Extremo (31-1 nm) (Pachauu y Tiwari 2008). Considerando el efecto de la radiación sobre la salud humana y el medio ambiente, a una longitud de onda de 100 a 400 nm, se divide en: UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm), UV-C (200-280 nm) y Vacío-UV (100-200 nm) (a veces considerada UV-C o UV-Extremo). En la literatura, han sido documentadas variaciones en los intervalos y la nomenclatura. La luz UV-C posee el mayor efecto germicida, específicamente entre 250 y 270 nm, y la máxima eficiencia para la desinfección se sitúa específicamente a 254 nm (Christen *et al.*, 2013), ver el círculo rojo. El componente UV en el espectro de radiación electromagnética se presenta en la Figura 3.7 (Russell, 2010).



Figura 3.7. Espectro de radiación electromagnética. En el círculo rojo se encuentra la región UVC, radiación que produce el mayor efecto germicida.

Si bien el sol es una fuente de luz ultravioleta, la absorción de la radiación de onda corta por parte de la capa de ozono de la tierra impide que cantidades significativas de UVB y UVC alcancen la superficie de la tierra. Por ello, las aplicaciones prácticas de desinfección UV dependen de fuentes artificiales de UV. Las fuentes de UV más comunes son lámparas de arco de mercurio de baja y mediana presión que están disponibles comercialmente. Una lámpara típica de arco de mercurio (figura 3.8) consiste en un tubo de sílice vítrea o cuarzo, ambos transmisores de UV, herméticamente cerrado y con electrodos a ambos extremos (Phillips, 1983).

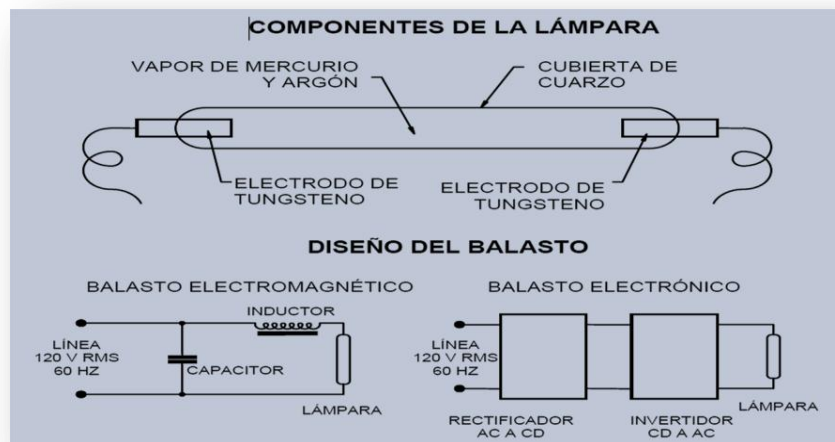


Figura 3.8. Construcción de una lámpara de arco de mercurio y diseño del balasto (Wright y Cairns, 2005).

El tubo se llena con una pequeña cantidad de mercurio y un gas inerte, usualmente argón. Los electrodos están compuestos usualmente de tungsteno con una mezcla de metales de tierra alcalinos para facilitar la formación del arco dentro de la lámpara. Se logra una descarga de gas mediante la aplicación de un voltaje elevado a través de los electrodos. La lámpara emite luz UV cuando el vapor de mercurio, excitado por la descarga, retorna a un nivel menor de energía. El argón presente ayuda a arrancar la lámpara, extender la vida del electrodo, y reducir las pérdidas térmicas, pero no contribuye en sí a la emisión de luz UV por parte de la lámpara.

Debido a las características de resistencia eléctrica negativa de las descargas de gas, la operación estable de una lámpara de arco de mercurio requiere de un balasto adecuado. Si la lámpara es operada usando un suministro de corriente alterna, el balasto usualmente tiene componentes inductivos y capacitivos. Los balastos pueden ser electromagnéticos o electrónicos (O'Brien *et al.*, 1995; Phillips, 1983). Los balastos electromagnéticos típicos constan de un inductor en serie con la lámpara y un condensador corrector del factor de potencia en paralelo. La energía se entrega a la lámpara a una frecuencia de línea de 50 o 60 Hz. Los balastos electrónicos, por otra parte, tienen un rectificador AC-DC seguido de un inversor para convertir la corriente continua en corriente alterna de alta frecuencia en el rango de los kilohertz. En comparación con los balastos electromagnéticos, los balastos electrónicos son más compactos, reducen los costos del sistema, tienen una mayor eficiencia eléctrica y pueden operar con diferentes niveles de potencia (O. Brian *et al.*, 1995). Similarmente, la operación de la lámpara a una frecuencia AC mayor aumenta el rendimiento de la lámpara y prolonga su vida útil (Phillips, 1983). La Figura 3.9 presenta una comparación de la salida espectral de las lámparas de arco de mercurio de baja y mediana presión.

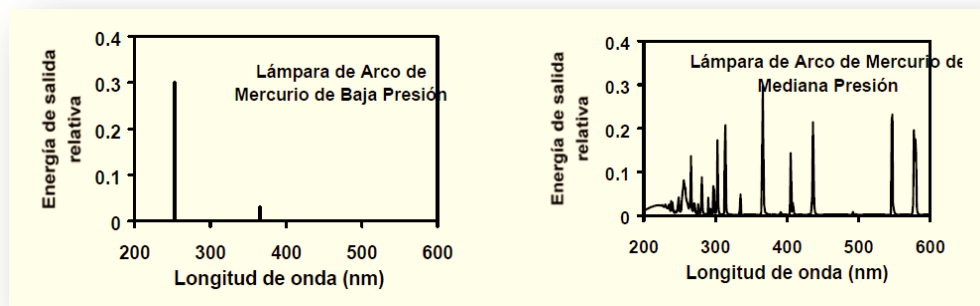


Figura 3.9. Salida espectral de lámparas de arco de mercurio de baja y mediana presión (Wright y Cairns, 2005).

Las lámparas de arco de mercurio de baja presión usadas en la desinfección de agua varían en longitud de 35 a 163 cm y tienen un diámetro entre 1,2 y 1,9 cm. Durante la fabricación de la lámpara, se introduce el mercurio en la lámpara en la forma de una sola gota (50-100 mg Hg en una lámpara de baja presión de 1.5 m (O'Brian *et al.*, 1995). Las lámparas están diseñadas para operar a su óptima eficiencia con una temperatura de 40°C en la pared de lámpara y una potencia de arco eléctrico cercana a 0.3 W/cm (Phillips, 1983). Bajo estas condiciones, la presión del vapor de mercurio dentro de la lámpara es de 0.9 Pascales y la mayor parte del mercurio dentro de la lámpara se encuentra en estado líquido. La construcción, llenado, y operación de una lámpara de baja presión se eligen de manera tal que se maximice la conversión de energía eléctrica a radiación UV resonante a 254nm y 185nm. Aproximadamente 85% de la luz emitida por una lámpara de baja presión es radiación UV resonante. Incluidas las pérdidas del balasto, la conversión de energía eléctrica a luz UV tiene una eficiencia aproximada de 35 a 40% (O'Brian *et al.*, 1995). Una lámpara de baja presión estándar de 147 cm de longitud debe producir 26.7 watts de UV a 254nm cuando se le conecta a una fuente de energía de 75 watts. Las lámparas de arco de mercurio de mediana presión usadas en la desinfección de agua varían en longitud de 25 a 70 cm y tienen un diámetro de cerca de 2.2 cm.

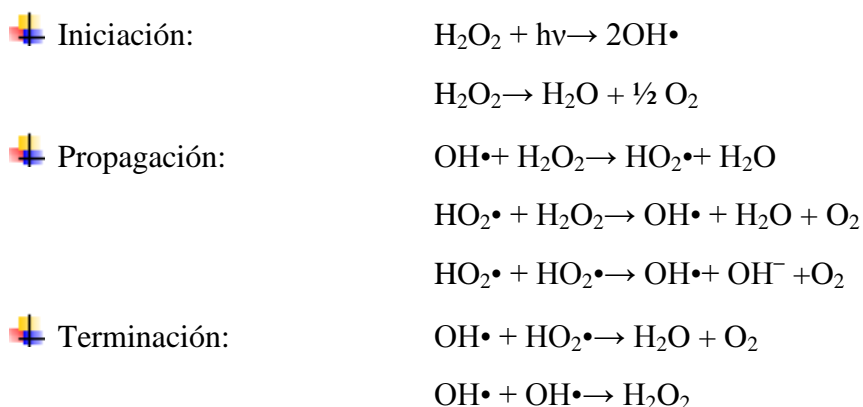
Durante la fabricación de la lámpara, se le introduce una masa medida de mercurio (1,4 a 15 mg Hg/cm de longitud del arco). Las lámparas están diseñadas para operar a una potencia de arco eléctrico relativamente alta, de 48 a 126 watts/cm (Phillips, 1983). De igual manera, la temperatura de pared de la lámpara se encuentra entre 650 y 850 °C y todo el mercurio dentro de la lámpara se vaporiza a una presión de vapor cercana a 13 kPa. Debido a la alta temperatura del plasma dentro de la lámpara de mediana presión, el mercurio vaporizado se encuentra en varios estados de excitación. El paso de estos niveles de excitación a un nivel de energía menor da como resultado la liberación de luz con diferentes longitudes de onda. En consecuencia, la salida espectral de una lámpara de mediana presión consiste en numerosos picos con un continuo de UV por debajo de 245 nm. Si se ignora la radiación por debajo de 248.3 nm, Phillips (1983) reporta que una

lámpara de mediana presión que opere con una potencia de arco eléctrico de 107 watts/cm produce 9.38 watts/cm de UVC y 8.19 watts/cm de UVB.

Entonces, por lo menos 44% de la radiación total emitida por una lámpara de mediana presión es UVB y UVC. La conversión de energía eléctrica a UVB y UVC tiene una eficiencia de por lo menos 16%. De acuerdo con esto, una lámpara de mediana presión de 25cm de longitud puede producir 450 watts de UVB y UVC suministrándosele una energía eléctrica de 2.8 kw. Si bien las lámparas de baja presión son eléctricamente más eficientes que las lámparas de mediana presión, estas últimas producen una potencia UV mayor por lámpara. En consecuencia, los sistemas UV de mediana presión tienen menos lámparas, ocupan menos espacio y requieren menos mantenimiento.

De igual forma, debido al menor número de lámparas, los sistemas UV de mediana presión pueden incorporar, en forma económica, sistemas automáticos de limpieza para remover la suciedad que se acumula en las lámparas durante la desinfección de agua, con lo que se reduce la mano de obra asociada con el mantenimiento de las lámparas. La decisión de escoger el sistema apropiado para una aplicación específica ya sea un sistema de baja presión, uno de mediana presión o una combinación de ambos, dependerá de los factores específicos del lugar.

Las principales reacciones del mecanismo de oxidación por la radiación UV son las siguientes:



Capítulo 4

Metodología Experimental

Metodología Experimental

4.1 Ubicación del sitio de muestreo

El sitio de recolección de muestras en la laguna de lixiviados del relleno sanitario del Centro Ecológico de Manejo Integral de Residuos Querétaro (CEMIRQ), en el municipio de Colón, Querétaro. En la figura 4.1 se indica la laguna de lixiviados de donde se recolectaron las muestras.



a) Vista general del relleno sanitario



b) Vista de la laguna de lixiviados y los cuatro puntos de muestreo

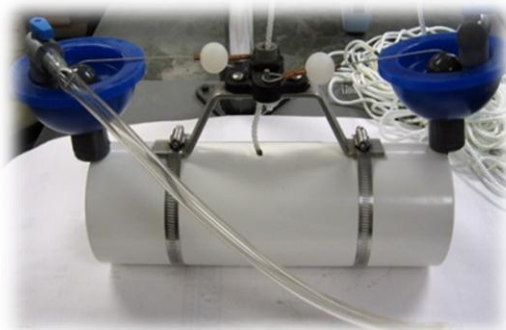
Figura 4.1. Imágenes satelitales del Relleno Sanitario CEMIRQ donde se marca su laguna de lixiviados (Fuente: Google Earth).

El muestreo se realizó el 17 de diciembre del 2019 considerando la norma NMX-AA-003-1980 (SCFI, 1980), recolectando 3 muestras por sitio en cuatro sitios accesibles de la laguna.

Como se indica en la figura 4.2a, se denominaron: Lag1, Lag2, Lag3 y Lag4 por cada promedio considerando tres muestras por cada sitio, se utilizó para el muestreo un equipo van Dorn (figura 4.2b) a 1.50 m de profundidad; la laguna presentó una profundidad promedio de 2.5 metros.



a)



b)

**Figura 4.2. a) Distribución de los muestreos por sitio.
b) Muestrador van Dorn.**

Estas muestras se conservaron a 4°C durante su transporte a las instalaciones del Área de Química y Físicoquímica Ambiental de la UAM-A, y posteriormente se refrigeraron para su tratamiento. Dado el problema del Covid-19 y el poco tiempo que dura el proyecto de integración solo se pudo realizar un muestreo.

4.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos y químicos

Se determinaron los siguientes parámetros para la caracterización de los lixiviados del relleno sanitario:

4.2.1 Parámetros *In Situ*

El pH, la temperatura y la conductividad, se midieron con un equipo de campo interfase LabQuest-Vernier, basándose en las normas NMX-AA-008-SCFI-2016 (SCFI, 2016a), NMX-AA-007-SCFI-2013 (SCFI, 2013) y NMX-AA-093-SCFI-2018 (SCFI, 2018), respectivamente y se consideró el manual del fabricante para cada caso. En cuanto al potencial redox (ORP) también se utilizó un equipo LabQuest-Vernier y su respectivo electrodo, utilizando la técnica ASTM, (1996) ver Figura 4.3.



a)



b)

Figura 4.3. a) Equipos de campo interfase LabQuest-Vernier y b) electrodos pH, conductividad y ORP

4.2.2 Parámetros *Ex situ*

4.2.2.1 Determinación de los Sólidos Totales (ST), Suspendidos (SST) y Disueltos (SDT)

Para la determinación de los sólidos totales (ST), suspendidos (SST) y disueltos (SDT), se utilizó la norma NMX-AA-034-SCFI-2015

4.2.2.2 Análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para el análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), las muestras se oxidaron en un reactor HI839800 HANNA Instruments, basándose en el Standard Methods 5520C (Standard Methods, 1997) figura 4.4a.



a) Digestor Reactor CR-2200



b) Espectrofotómetro de luz visible DR/2400 de Hach DR/2400

Figura 4.4. Equipos utilizados para la determinación de la DQO.

Posteriormente se midió en un espectrofotómetro DR/2400 HACH, según el Standard Methods 5520 D (Standard Methods, 1997). Figura 4.4b.

4.2.2.3 Seguimiento de las diferentes etapas de tratamiento mediante Espectroscopía Infrarroja

Para el seguimiento de las diferentes etapas de tratamiento (oxidación Fenton, Ozonación y radiación UV) se utilizó la Espectroscopía IR mediante un equipo ThermoScientific modelo iS10. Figura 4.5



Figura 4.5. Espectrofotómetro IR, ThermoScientific modelo iS10.

Todas las medidas y análisis de los diferentes parámetros se efectuaron por triplicado.

4.2.2.4 Oxidación por el reactivo Fenton

Se efectuó la oxidación por el reactivo Fenton en las muestras de lixiviado crudo considerando las siguientes condiciones de reacción (Zamora *et al.*, 2014b; Zamora *et al.*, 2016), el parámetro de monitoreo será la DQO.

4.2.2.5 Ajuste del pH

Primero se ajustó el pH entre 3-5, esto es realmente importante para la correcta adición del Fe^{2+} y del H_2O_2 . Se utilizó la sal FeSO_4 que contiene el H_2SO_4 concentrado y la adición del H_2O_2 es responsable de la fragmentación del material orgánico.

4.2.2.6 4.2.2.3. Relación Fe/ H_2O_2

Se añadieron 5.11g de la sal de hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y se adicionó lentamente el H_2O_2 al 30% (marca Baker) hasta completar 15mL para tener la relación Fe/ H_2O_2 de 0.125 (previamente optimizada, siguiendo la metodología de Zamora, (2014)) a razón de 1 mL cada minuto

4.2.2.7 Caracterización por Infrarrojo

Se caracterizó por IR el lixiviado después del tratamiento con el reactivo Fenton, además midiendo los parámetros pH, conductividad, ORP, DQO, COT, derivados nitrogenados y metales, utilizando las técnicas descritas en el inciso 4.2.1

4.2.2.8 Oxidación por Ozono

Se realizó el tratamiento con ozono (ozonación) después del tratamiento de oxidación con el reactivo de Fenton en lotes (Batch) Figuras 4.6a y 4.6b. El parámetro para realizar la ozonación en cada caso fue la DQO, esta se monitoreó a diferentes tiempos: (0,20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 min). La velocidad de flujo del ozono y la adición de H_2O_2 , así como el pH de trabajo, el cual se tomó de la experiencia de Morales, 2013, el ozono se produjo en un generador de ozono marca O3Residual construido específicamente, ver Figura 4.6b. El régimen de trabajo usual de este generador se establece en 0.4 litros de oxígeno por minuto y un voltaje de operación de 7kVolts. La reacción de ozonación se llevó a cabo en un reactor de vidrio 31x3.8 cm con boca estándar 34/45 durante 8 horas, se utilizó un intervalo de pH entre 7 y 8.

La tapa contiene tres tubos de entrada/salida: una sirve para la admisión del flujo de oxígeno enriquecido con ozono y tienen un tubo con bujía de vidrio filtrante que sirve para que los gases de entrada formen burbujas muy pequeñas que aumentan la superficie de intercambio del ozono entre el oxígeno y la solución de trabajo, la otra abertura sirve de salida para los gases que han circulado en el interior. Esta salida se conecta a una trampa para gases donde se pone una solución de yoduro que se encargará de eliminar el ozono residual de la reacción, evitando que salga a la atmósfera del laboratorio y sea respirado. Por la tercera abertura se pasa un tubo que permite tomar muestras de líquido reaccionante, sin tener que destapar el reactor.

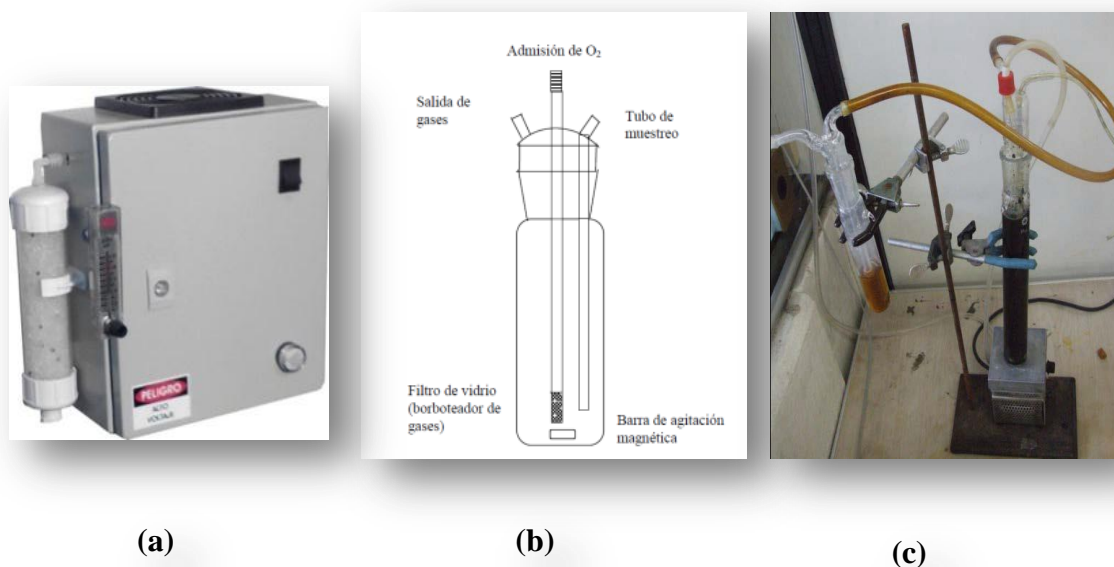


Figura 4.6. a) Generador de Ozono, b) esquema del reactor para Ozonación y c) sistema para reacciones de degradación con ozono (Solís-Correa, 2010).

El reactor se carga con un volumen de 200 mL de lixiviado (tratado previamente por oxidación Fenton). Con una jeringa se extrajeron cada hora, muestras de 5 mL que se almacenaron en tubos de ensayo, esto se realizó al menos tres veces. Al terminar el experimento, de cada tubo de ensayo se tomó 1mL para realizar una dilución 1:10, para el análisis de DQO.

Se caracterizó por IR el lixiviado después del tratamiento por ozonación, además midiendo los parámetros pH, conductividad, ORP, DQO, COT, Todos los análisis se efectuarán como mínimo por triplicado.

4.2.2.9 Tratamiento de pulimento por radiación UV

Finalmente, para lograr el máximo de mineralización se efectuó un tratamiento de pulimento por exposición de las muestras provenientes del proceso de ozonación por radiación UV en presencia de H₂O₂ al 30%, con una lámpara de luz ultravioleta de alta densidad y longitud de onda larga de 365mm, intensidad de 21000 micro-W/CM² a 2" y 8900 micro-W/CM A 10". opera a 115 volts y 60hz, modelo Cole Parmer, ver Figura 4.7.



a)



b)

Figura 4.7. a) Lámpara UV utilizada para irradiar las muestras y b) lámpara con caja protectora

La exposición fue de cinco horas, monitoreando cada hora, extrayendo 5 mL y determinando la DQO, éste proceso se realizó como mínimo tres veces. Se caracterizó por IR el lixiviado después del tratamiento por UV, además midiendo los parámetros pH, conductividad, ORP, DQO. Todos los análisis se efectuaron por triplicado.

4.2.2.10 Sistema combinado Ozonación-UV

Por otro lado a otra porción de muestra tratada previamente con el reactivo Fenton se trató en el reactor combinando en un paso la ozonación y la radiación UV. El régimen de trabajo usual de este generador fue con las mismas condiciones que en el paso 4.2.2.5. El reactor para esta oxidación combinada se muestra en la figura 4.8.

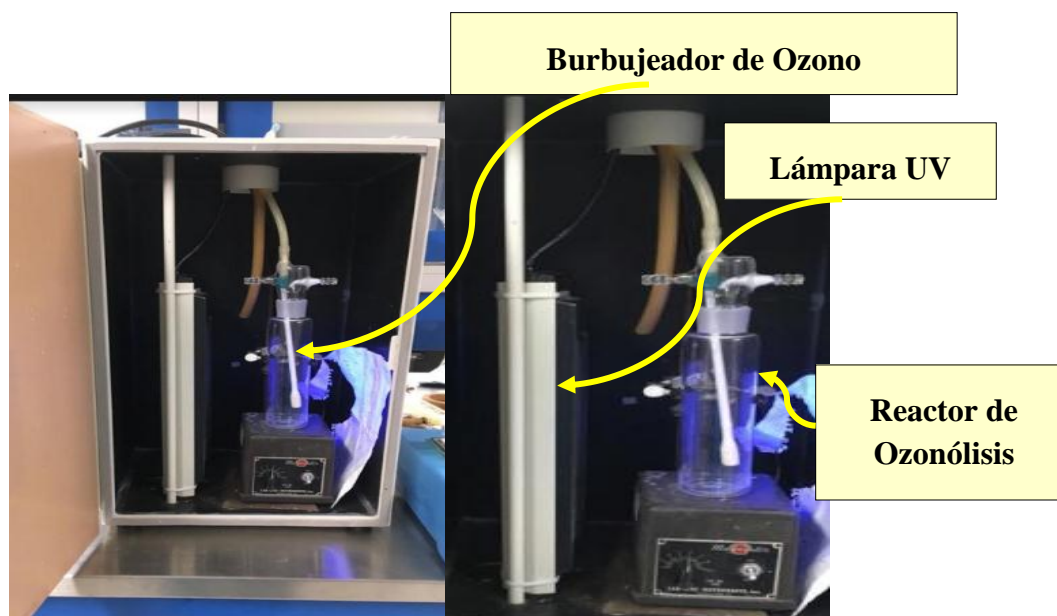


Figura 4.8. Sistema combinado Ozono-UV

4.3 Interpretación de los resultados

4.3.1 Se determinó la eficiencia de la remoción mediante el proceso Fenton

4.3.2 Se determinó la eficiencia de la remoción mediante la Ozonación

4.3.3 Se determinó la eficiencia de la remoción mediante la radiación por UV

4.3.4 Se determinó la eficiencia de la remoción mediante el método combinado y simultáneo Ozono-UV

4.4 Distribución de los parámetros fisicoquímicos y químicos mediante el software Arcgis

Capítulo 5

Resultados y su Interpretación

Resultados y su Interpretación

5.1 Software Arcgis

A continuación, se presentan los mapas mediante el software Arcgis de la laguna de lixiviados del Centro de Manejo Integral de Residuos Querétaro (CEMIRQ) en el Estado de Querétaro y de la distribución de los diferentes parámetros en los cuatro sitios seleccionados en el muestreo.

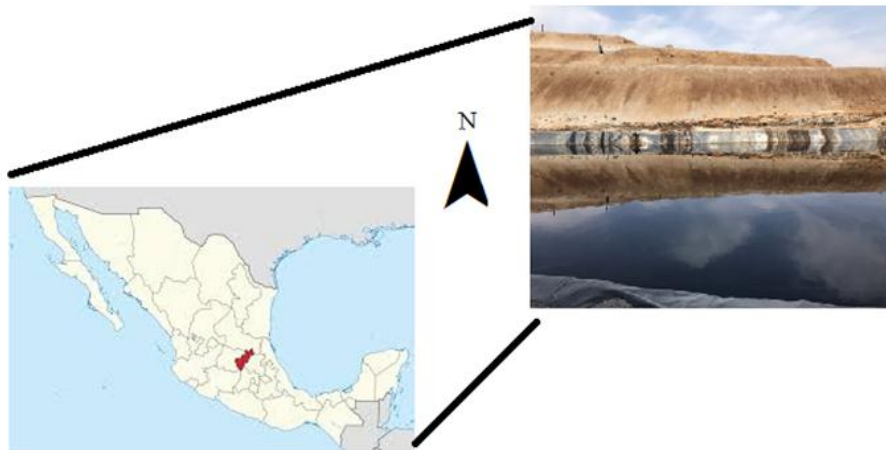


Figura 5.1. Ubicación de la laguna de lixiviados del CEMIRQ, Qro.

Este software contiene herramientas que permiten obtener Sistemas de Información Geográfica, interpoladores como el IDW y ArcMap para la elaboración de mapas. Dentro del software, se encuentra la herramienta de Análisis Geoestadístico (GIS), en donde se puede entre otras herramientas interpolar con la aplicación IDW y construir los mapas con el programa ArcMap. La predicción de la distribución de parámetros es útil para la evaluación, manejo y operación de proyectos de ingeniería de recursos hídricos. Los mapas de concentración juegan un papel muy importante en la evaluación de la calidad de un cuerpo acuático.

5.1.1 Distribución de la temperatura según el software Arcgis

Esta medida es un parámetro que determina si en el medio están presentes sustancias oxidantes o reductoras, es decir se produce un intercambio de electrones, midiendo la capacidad de las especies químicas presente en el agua de ganar o perder electrones y de manera efectiva permite conocer el saneamiento de un agua. Se ha demostrado que con un valor de ORP entre 650 y 700 mV, bacterias tales como *Escherichia Coli* y *Salmonella* son suprimidas en segundos

En la figura 5.2 se muestra como está distribuida la temperatura en la laguna de lixiviados, el color rosa presenta los valores más altos de la temperatura y el verde los más bajos, se nota que la temperatura no es homogénea en la laguna, el sitio 3 recibe más luz del sol, los sitios 2 y 1 al recibir menos luz solar son los sitios más fríos.

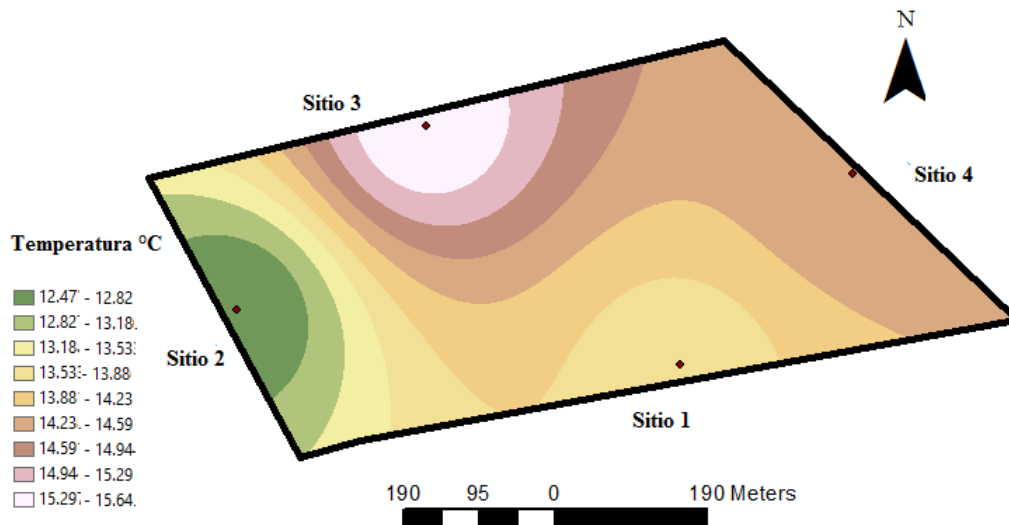


Figura 5.2. Distribución de la temperatura en la laguna de lixiviados.

5.1.2 Distribución de la conductividad según el software Arcgis

En la figura 5.3, de la misma manera que la temperatura, se tiene el mapa de distribución de la conductividad que está relacionada a los iones de aniones y cationes disueltos, los sitios 3 y 4 presentaron los valores más altos, esto coincide con la distribución de los sólidos disueltos, ver figura 5.10.

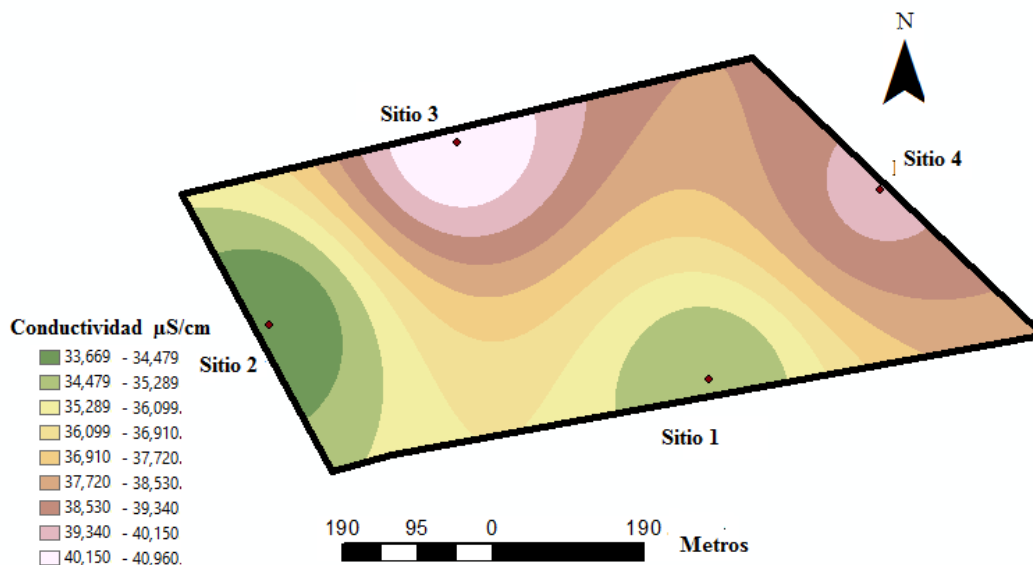


Figura 5.3. Distribución de la conductividad en la laguna de lixiviado.

5.1.3 Distribución del pH según el software Arcgis

El pH es importante en la composición de un lixiviado, debido a que depende no solo de la concentración de los ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del CO₂ en el gas del vertedero que está en contacto con el lixiviado. Estos resultados indican que los lixiviados están en la etapa posterior de la fase metanogénica. Esto significa que la edad del relleno sanitario, la lluvia y el tipo de desperdicio son los factores más importantes que afectan la composición del lixiviado (Dharmarathne, 2013).

En cuanto al pH, la zona correspondiente al sitio 4 presentó el mayor valor, aunque prácticamente los valores del pH fueron casi de 8.5, variando en el segundo decimal. Estos valores son importantes, pues prácticamente en toda la laguna los lixiviados ya presentan estabilidad, indicando la presencia de compuestos difícilmente oxidables, y pueden estar presentes compuestos de elevado peso molecular, donde será necesario para su degradabilidad utilizar oxidantes muy fuertes como el proceso Fenton y la Ozonación, además de una irradiación UV, como la que se está presentando en este proyecto.

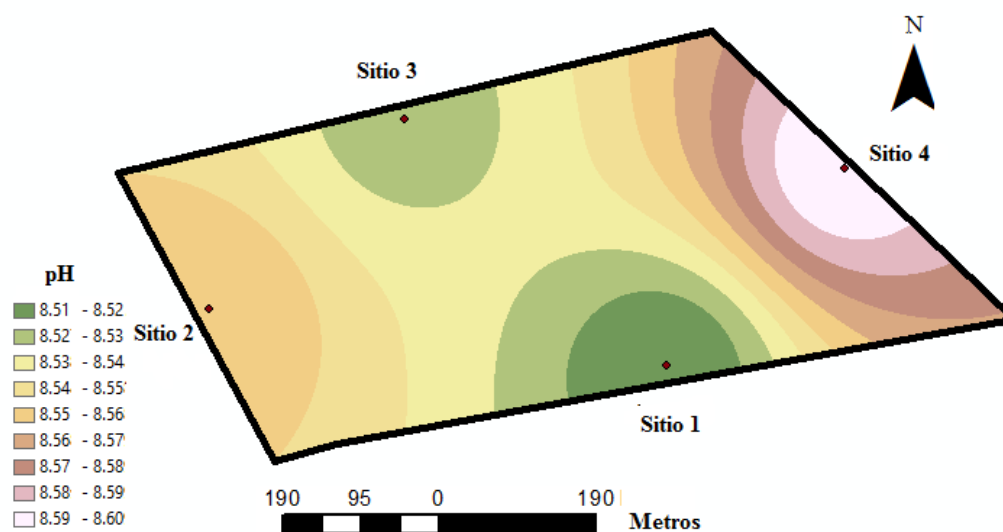


Figura 5.4. Distribución del pH en la laguna de lixiviados.

5.1.4 Distribución del Potencial Redox (ORP) según el software Arcgis

Un parámetro importante es el potencial redox (ORP), que está muy relacionado al oxígeno disuelto y a la DQO, en el mapa se puede ver que la concentración de este parámetro se centra en el sitio 3 y como se va distribuyendo en los otros sitios. El ORP indica cómo el OD está siendo utilizado naturalmente en la propia laguna durante el proceso de degradación, es hasta cierto un termómetro para medir las etapas de degradación, que junto con el pH se puede intuir cuando los lixiviados se estabilizan y poder planear procesos de tratamiento que se deban de utilizar.

Este parámetro además determina si en el medio están presentes sustancias oxidantes o reductoras, es decir se produce un intercambio de electrones, midiendo la capacidad de las especies químicas presente en el agua de ganar o perder electrones y de manera efectiva permite conocer el saneamiento dl mismo. Se ha demostrado que con un valor de ORP entre 650 y 700 mV, bacterias tales como *EscherichiaColi* y *Salmonella* son suprimidas en segundos.

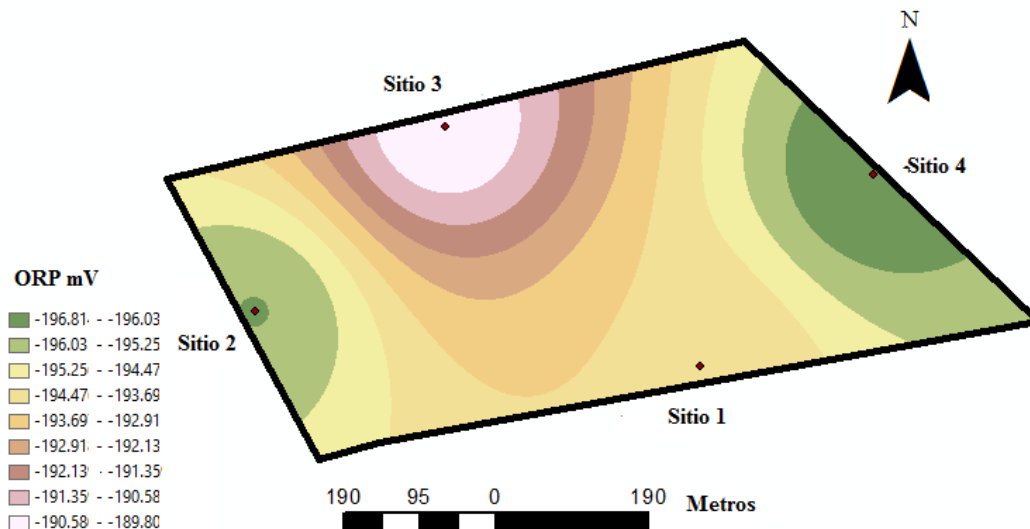


Figura 5.5. Distribución del ORP en la laguna de lixiviados.

5.1.5 Distribución del Oxígeno Disuelto (OD) según el software Arcgis

En la figura 5.6. Se presenta el mapa de distribución del Oxígeno Disuelto (OD) que junto con el ORP son importantes por su relación con la DQO. La importancia de este parámetro radica en que indica el grado de oxigenación de la laguna, la cual presenta anoxia por la muy baja concentración del OD en cada sitio, estos valores tan bajos coinciden con los valores negativos del ORP, mostrando en ambos mapas una distribución similar.

Debido que estos lixiviados ya se encuentra estabilizados (esto se presenta por el color oscuro que presentan), es lógico que la concentración de OD sea muy baja, se puede observar en la figura 5.6 que el sitio 4 muestra un pequeño valor más alto, posiblemente el sentido del viento le permita un poco de disolución de OD o quizá la lluvia, aunque este es rápidamente utilizado en la degradación del material carbonáceo.

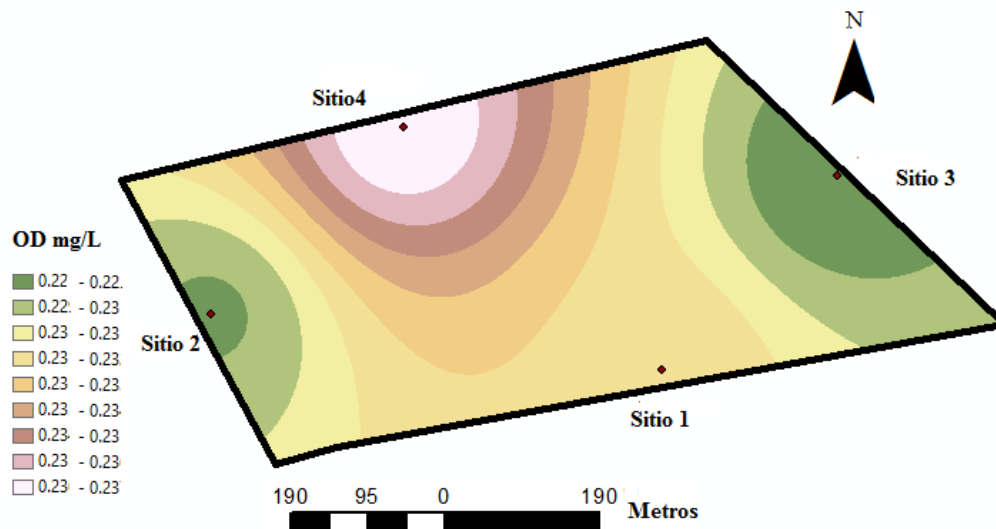


Figura 5.6. Distribución del Oxígeno Disuelto en la laguna de lixiviados.

5.1.6 Distribución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) según el software Arcgis

El parámetro más crítico para el tratamiento de lixiviados es la DQO. La DQO es considerada como la cantidad total de la reducción de materiales en muestras acuosas. Es conocido poco acerca de la contribución exacta de cada componente al total del valor de la DQO debido a la complejidad de los lixiviados de un relleno sanitario. Sin embargo, es necesario investigar la composición de la DQO en los lixiviados ya que puede ayudar a mejorar la comprensión de la distribución, comportamiento ambiental y destino de cada componente individual (Tchobanoglus *et al.*, 1996).

Las diferencias en los valores de DQO pueden deberse a: el diseño del relleno sanitario, la composición de los RSU, las características del sitio y la edad del relleno sanitario. Las pruebas de DQO miden el carbón orgánico total con excepción de ciertos compuestos aromáticos, tales como el benceno, el cual no es oxidado completamente con la reacción. La prueba de DQO es una reacción de oxidación-reducción, la cual reduce sustancias tales como sulfuros, sulfitos y ion férrico.

Si se analiza el mapa de distribución la DQO presenta un panorama inverso al del OD ya que es un parámetro relacionado con la cantidad de oxígeno consumido por el material oxidable existente en la laguna, cualquiera que sea su origen, orgánico o mineral. También por lo tanto al del ORP.

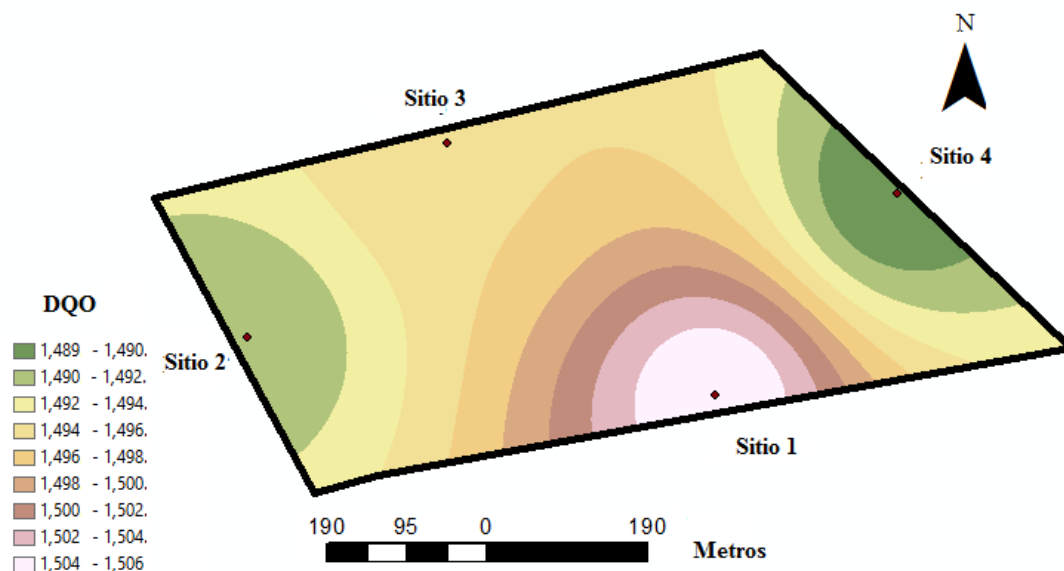


Figura 5.7. Distribución de la DQO en la laguna de lixiviados.

5.1.7 Distribución de los Sólidos Totales según el software Arcgis

En las figuras 5.8. 5.9 y 5.10 se presentan los mapas de distribución de los Sólidos Totales (ST), Sólidos Suspendidos Totales (SPT) y Sólidos Disueltos Totales (SDT). La mayor acumulación de los ST fue en los sitios 3 y 4 respectivamente, lo cual se podría deber a la pendiente o inclinación de la laguna y al viento.

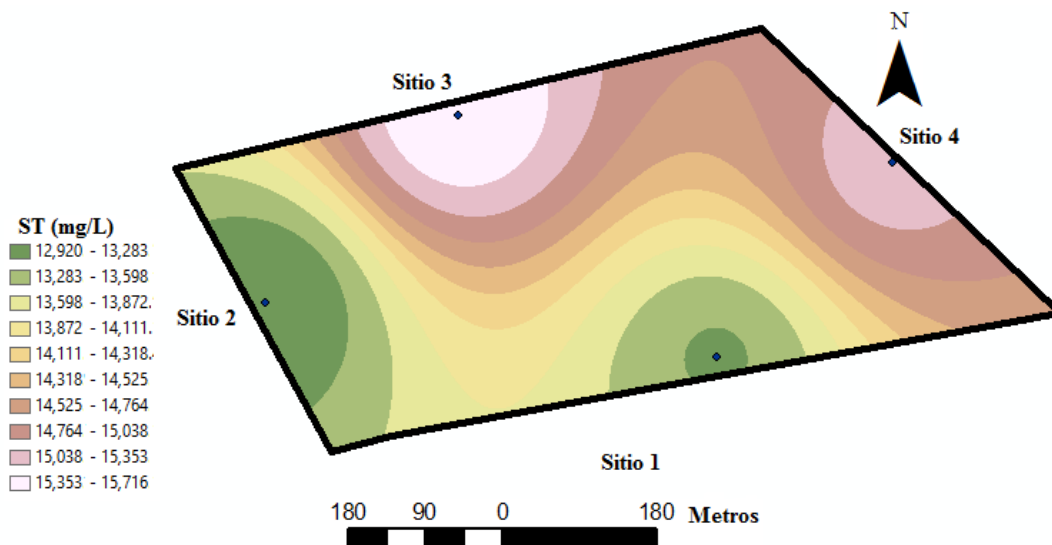


Figura 5.8. Distribución de los Sólidos Totales (ST) en la laguna de lixiviados.

En cuanto a los SST comparados con lo SDT, resultaron en una gran proporción menor, Concentrándose más en el sitio 3, éstos podrían estar más concentrados en el fondo de la laguna ya como un sedimento.

5.1.8 Distribución de los Sólidos Suspendedos Totales (SST) según el software Arcgis

En la distribución de los sólidos suspendidos la concentración mayor se refleja en el sitio3, principalmente, aunque en los demás sitios la diferencia no fue muy grande, esto indica una distribución regularmente homogénea.

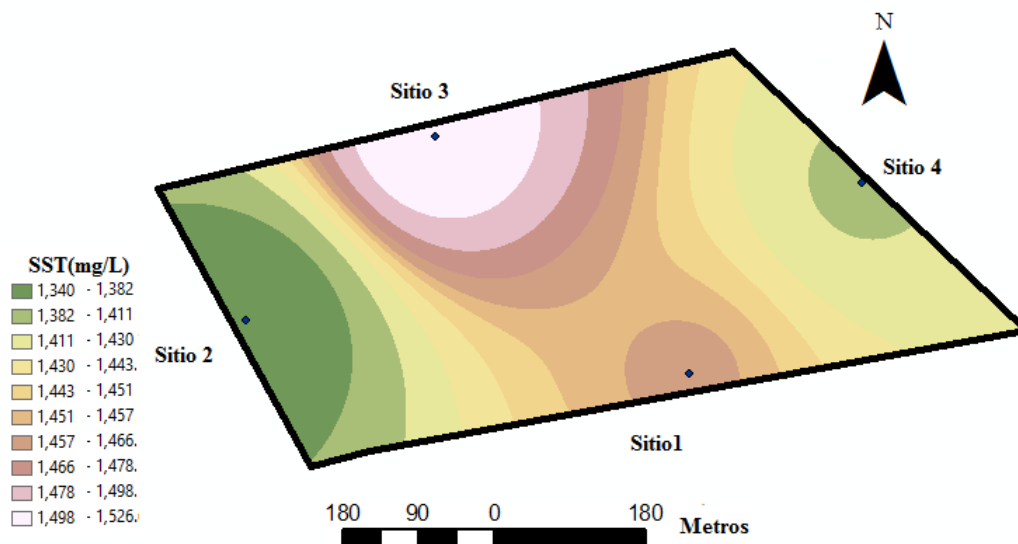


Figura 5.9. Distribución de los Sólidos Suspendedos en la laguna de lixiviados.

5.1.9 Distribución de los Sólidos Disueltos Totales (SDT) según el software Arcgis

Por otro lado, los SDT se presentaron en una gran concentración lo que justifica la alta conductividad en los sitios (Ver figura 5.3). Estos SDT se encontraron más concentrados en los sitios 3 y 4, semejante a los ST, lo que indica la mayor influencia de los SDT hacia los ST.

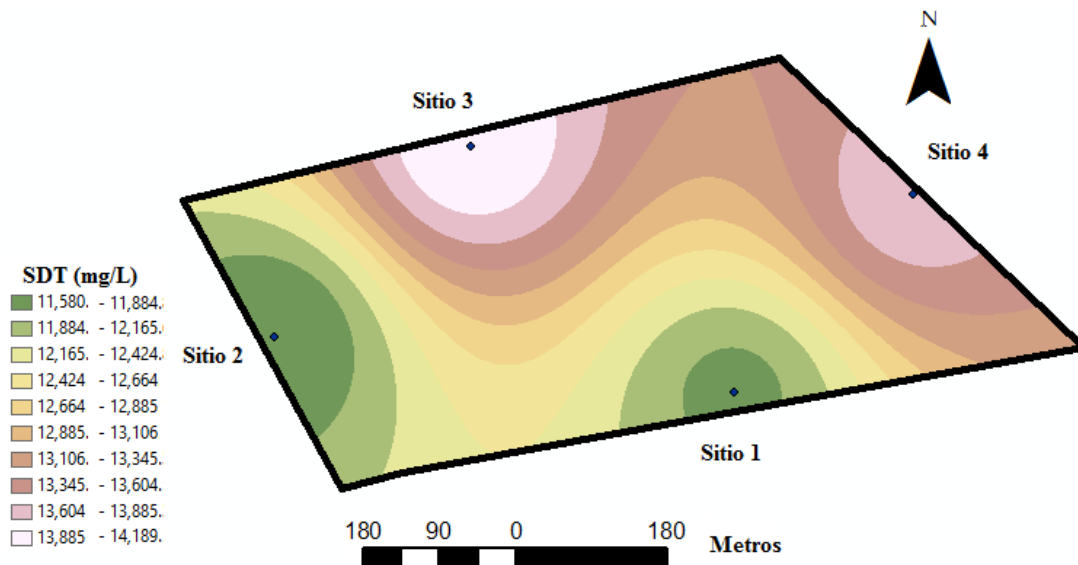


Figura 5.10. Distribución de los Sólidos Disueltos en la laguna de lixiviados.

5.2 Resultados de la medición de los parámetros *In Situ*

A continuación, se presentan los resultados de las medidas en campo, en la figura 5.11 se muestra la laguna con los sitios de muestreo, donde en cada sitio se tomaron tres muestras a un metro de distancia cada una y se efectuó una muestra compuesta por sitio.



Figura 5.11. Ubicación de los sitios de toma de muestras.

5.2.1 Resultados de la temperatura

En la figura 5.12 se indican los valores de las temperaturas de cada sitio, donde cada valor obtenido se efectuó por triplicado (Ver Apéndice 1) el valor más alto se obtuvo en el sitio Lag3 que es el sitio que recibe algo de sol y los sitios sitio Lag2 y Lag1, resultaron los de menor valor, estos sitios no reciben casi sol, debido al farallón que le impide la llegada de luz solar. El sitio Lag4 recibe algo de sol, ver la sección 4.1 (metodología experimental), y la figura 5.2 del modelado por ARCGIS en toda la laguna.

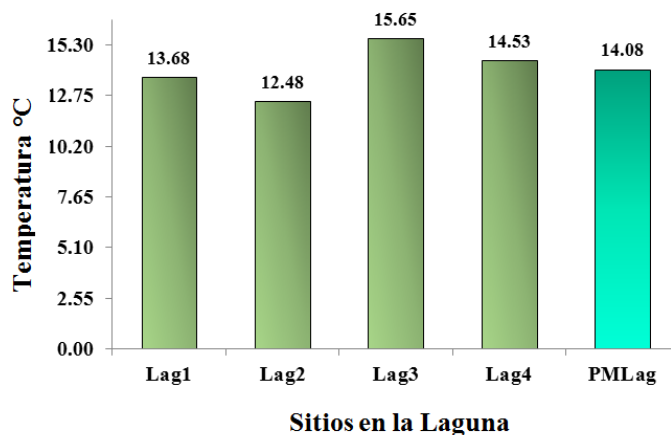


Figura 5.12. Valores de la temperatura en cada sitio de la laguna y el promedio de los cuatro sitios.

5.2.2 Resultados del pH

En la figura 5.13, se presentan los valores de pH en cada sitio, en general los valores de pH oscilaron entre 8.61 y 8.52, estos valores indican que la edad del lixiviado de la laguna está estabilizada, tienen una carga orgánica $< 2 \text{ gO}_2/\text{L}$ y ausencia de ácidos carboxílicos.

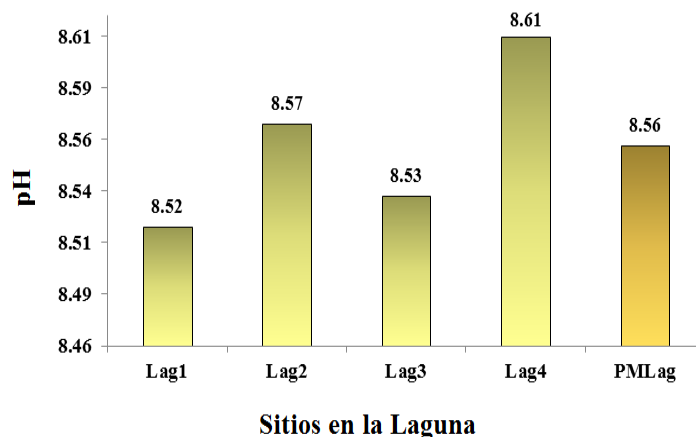


Figura 5.13. Valores del pH en cada sitio de la laguna y el promedio de los cuatro sitios.

Según Ehrig, (1983) y Ehrig, (1984), lixiviados con pH mayor a 8 están estabilizados, tienen una baja biodegradabilidad $\text{DBO}/\text{DQO}=0.1$, $\text{COT}/\text{DQO} = 0.4$ indicando la presencia

de compuestos difícilmente oxidables, presencia de compuestos de elevado peso molecular superior a 5000 g/mol. En cuanto a cada sitio de la laguna el sitio Lag4 presentó el pH algo mayor, seguido del sitio Lag2, luego el Lag3, siendo el sitio Lag1 el de menor valor, esto está relacionado con la actividad microbiana, aunque prácticamente el pH en la laguna es homogéneo.

5.2.3 Resultados de la conductividad

En la figura 5.14, se observan los valores de la conductividad en cada sitio, todos los valores resultaron altos, principalmente el sitio Lag3, seguido del Lag4, los sitios Lag1 y Lag2 resultaron los más bajos, aunque en general como se indicó, los valores de la conductividad resultaron altos, lo que significa la presencia probable de iones como sodio, potasio, calcio, principalmente y aniones como nitritos (por la casi nula presencia de OD), cloruros, bicarbonatos (el pH en la región de valores entre 8.61 y 8.52 indican el predominio de los bicarbonatos, figura 5.15), probablemente sulfuros HS⁻, por la casi nula oxigenación.

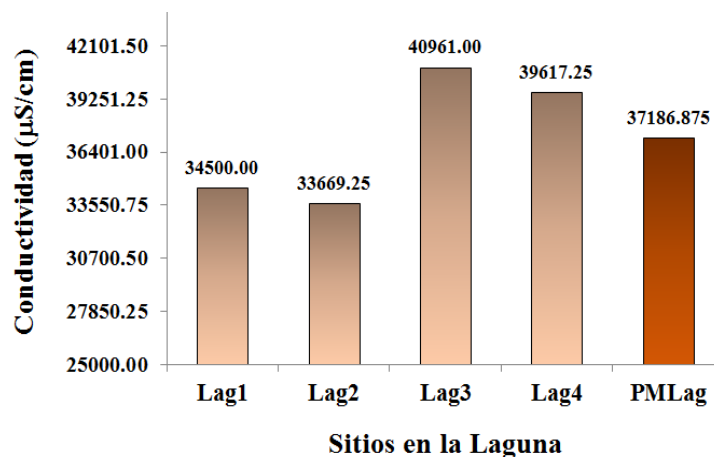


Figura 5.14. Valores de la conductividad en cada sitio de la laguna y el promedio de los cuatro sitios.

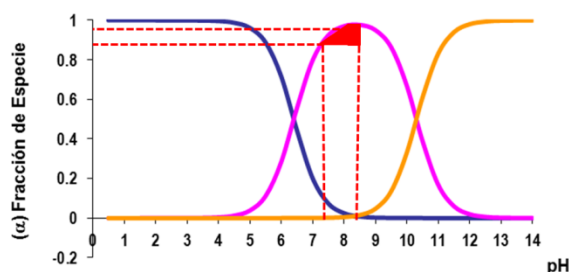


Figura 5.15. Distribución de especies del sistema carbonato.

5.2.4 Resultados del potencial redox (ORP)

El potencial redox (ORP), está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno, en las aguas, si el oxígeno está en equilibrio con el atmosférico y el pH es de 7, el valor es de +0.86 mV a 0 °C y de +0.80 mV a 25°C. En los ecosistemas acuáticos se encuentra una

zona superior oxidada y a medida que se desciende en profundidad se agota el suministro de oxígeno y aparece una zona reducida. El potencial redox es positivo en la zona oxidada y negativo en la zona reducida. En cuanto a valores negativos significa la pobreza de oxígeno en el cuerpo de agua y si existe gran cantidad de materia orgánica, ésta consume el OD durante el proceso de oxidación, como el caso de los lixiviados, por lo que el ORP es un parámetro importante que se debe considerar, pues está íntimamente relacionado al oxígeno disuelto (OD), como se puede observar en el caso de esta laguna de lixiviados, los valores de ORP resultaron muy negativos en todos los sitios, lo que significa muy baja concentración de oxígeno, lo que se demuestra en la figura 5.16, el sitio que presentó el valor más bajo fue el Lag4, seguido de los sitios Lag2 y Lag1; siendo el sitio Lag3 el que presentó el menor valor.

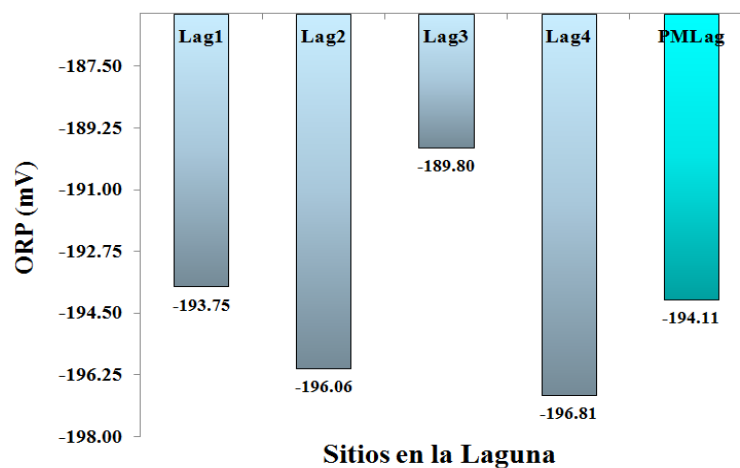


Figura 5.16. Valores del potencial redox (ORP) en cada sitio de la laguna y el promedio de los cuatro sitios.

5.2.5 Resultados del oxígeno disuelto (OD)

Mucho del oxígeno disuelto en un cuerpo de agua superficial viene de la atmósfera, después de la disolución en la superficie, el oxígeno se distribuye por la corriente y la turbulencia del cuerpo de agua. Las algas y las plantas acuáticas también ceden oxígeno al agua mediante la fotosíntesis. El principal factor que contribuye a los cambios en los niveles de oxígeno disuelto es la cantidad requerida (consumo) para la oxidación del material orgánico, (Manahan, 1994). La temperatura, la presión y la salinidad afectan la capacidad del agua para disolver el oxígeno y si se observa la figura 5.9 de la temperatura, estos valores permiten una adecuada disolución de O₂, el problema es la cantidad de material orgánico que se necesita oxidar en la laguna. Cabe indicar que una laguna de lixiviados, además de actuar como una laguna de estabilización, el objetivo de esta es el de oxidar el material orgánico principalmente, esto es típico por el color que presentan, como es el caso de los lixiviados de la laguna sujeta a estudio, ver figura 5.17



Figura 5.17. Color en la laguna de lixiviados del CEMIRQ.

En la figura 5.18, el sitio Lag3 presentó el mayor valor de OD y al compararlo con la gráfica del ORP, figura 5, este sitio es el que presentó el menor ORP. Por lo contrario, los sitios Lag4 y Lag2, respectivamente son los que presentaron los valores más negativos de ORP.

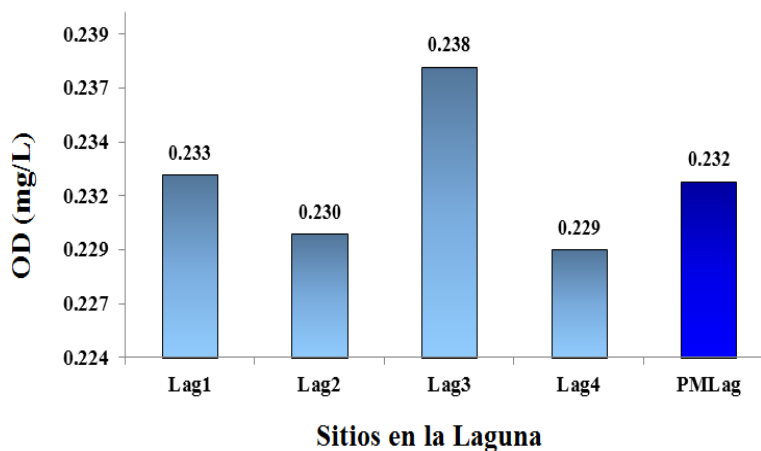


Figura 5.18. Valores del OD en cada sitio de la laguna y el promedio de los cuatro sitios.

5.3 Resultados de la medición de parámetros *Ex Situ*

5.3.1 Determinación de los Sólidos Totales (ST)

En la figura 5.19 se muestra la variación de la concentración de los Sólidos Totales (ST) en cuatro sitios de la laguna de lixiviados, donde el sitio denominado Lg3 presentó la mayor

concentración seguido por el sitio Lag4. Los sitios Lag1 y Lag2 presentaron las concentraciones menores entre un 15.77% y un 17.79% menores respectivamente.

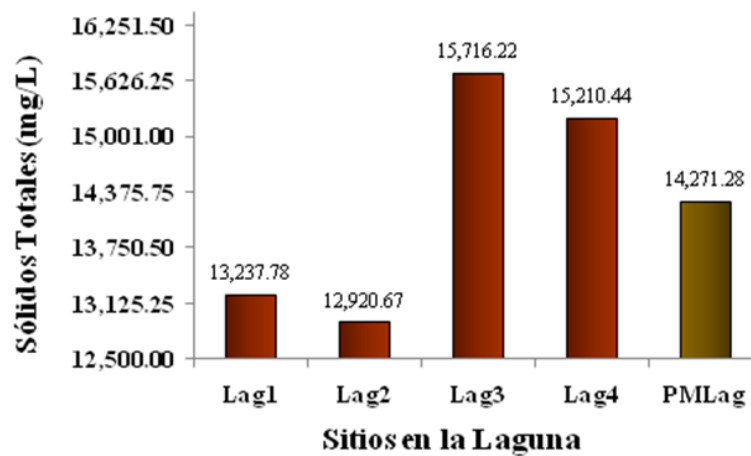


Figura 5.19. Concentración de los Sólidos Totales (ST) en cuatro sitios de la laguna de lixiviados y el promedio en la Laguna.

5.3.2 Determinación de los Sólidos Suspendidos (SST)

En la figura 5.20 se presentan las diferentes concentraciones promedio por sitio, respecto a los sólidos totales esta fase presentó concentraciones mucho menores que las de la fase disuelta. El sitio Lag3 presentó la mayor concentración respecto a los demás, seguida del sitio Lag1. En general todos los sitios presentaron concentraciones menores respecto a las de los ST y los SDT. En este caso el sitio de menor concentración fue el Lag2 seguido del Lag4 con un 12.23% y 7.86% menor respectivamente con relación al sitio Lag3.

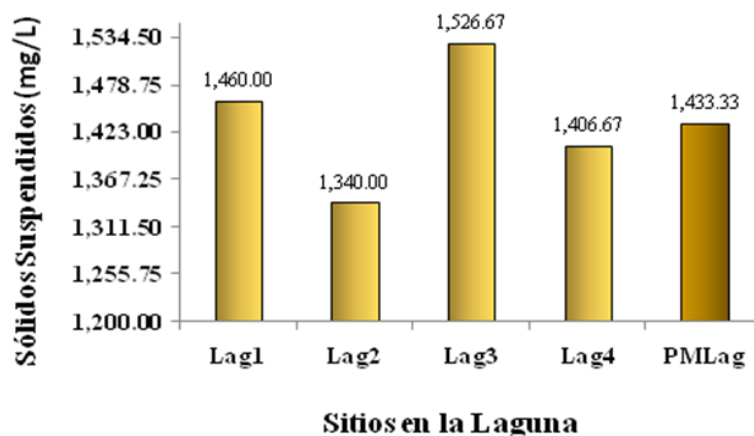


Figura 5.20. Concentración de los Sólidos Suspendidos (SST) en cuatro sitios de la laguna de lixiviados y el promedio en la Laguna.

5.3.3 Determinación de los Sólidos Disueltos (SDT)

La concentración de los Sólidos Disueltos (SDT) promedio en cada sitio se indica en la figura 5.21, se observa que esta fase presentó la concentración más elevada, justificando la alta conductividad mostrada en la laguna, donde el sitio denominado Lg3 presentó la mayor concentración seguido por el sitio Lag4. Los sitios Lag1 y Lag2 presentaron las concentraciones menores entre un 18.39 % y un 17.00 % menores respectivamente respecto al sitio Lag3, que fue el de mayor concentración.

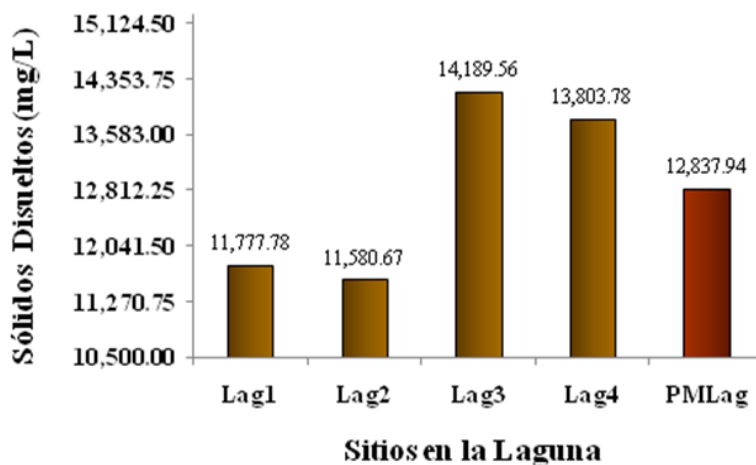


Figura 5.21. Concentración de los Sólidos Disueltos (SDT) en cuatro sitios de la laguna de lixiviados y el promedio en la Laguna.

5.3.4 Determinación de la DQO en los lixiviados crudos

Los lixiviados como se indicó en la metodología experimental, se determinaron primero en el material crudo mediante la Demanda Química de Oxígeno (DQO). En las siguientes figuras 5.22, 5.23, 5.24, 5.25 y 5.26, se presentan los resultados de los análisis de las muestras en cada sitio y su promedio. Finalmente, en la figura 5. se indican los promedios de los lixiviados crudos en cada sitio y un promedio en general en la laguna. En la figura 5.22, la muestra LC1.3 fue ligeramente mayor respecto a los otros dos con un promedio del sitio de $15068 \text{ mg/L} \pm 18.95$ de la DQO.

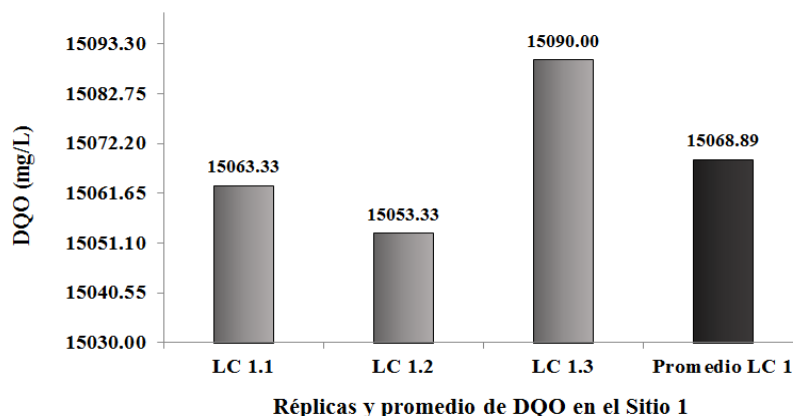


Figura 5.22. Concentración de la DQO en el sitio Lag1 de la laguna de lixiviados y el promedio del sitio Lag1.

En el caso del sitio 2 la concentración de lixiviados fue menor que en el sitio 1, con un promedio de $14913.33 \text{ mg/L} \pm 38.44$ de la DQO.

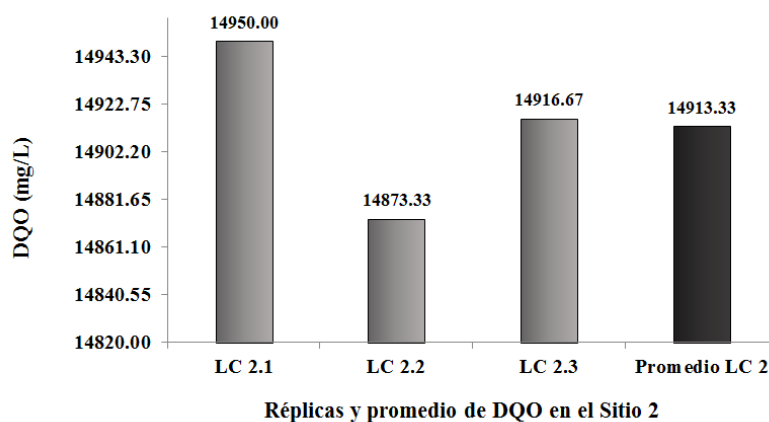


Figura 5.23. Concentración de la DQO en el sitio Lag2 de la laguna de lixiviados y el promedio del sitio Lag2.

Para el sitio 3 la concentración de lixiviados fue un poco mayor que el sitio 2 pero menor que el sitio 1 con un valor promedio de $14966.67 \text{ mg/L} \pm 6.67$ de la DQO. Por último, en el sitio 4 se encontró una concentración promedio de $14888.89 \text{ mg/L} \pm 30.25$.

En la figura 5.24, finalmente se indican, considerando los promedios de la DQO de cada sitio, el promedio general de la concentración de la laguna de $14959.44 \text{ mg/L} \pm 2.36$. Es importante ver la variación de la DQO en la laguna (figura 5.7), y su relación con los demás parámetros fisicoquímicos, donde se observa la influencia de la temperatura, del pH, ORP y OD. Existe poca heterogeneidad en la distribución de la DQO en toda la laguna y su relación también de los sitios a los que no llega un poco de incidencia solar, respecto a los que sí la tienen.

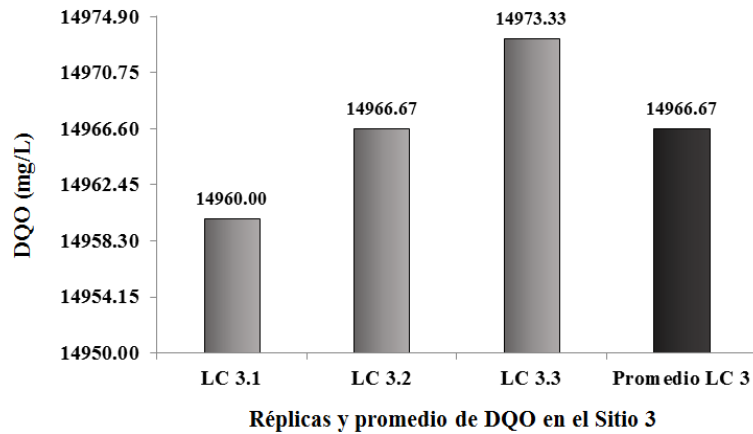


Figura 5.24. Concentración de la DQO en el sitio Lag3 de la laguna de lixiviados y el promedio del sitio Lag3.

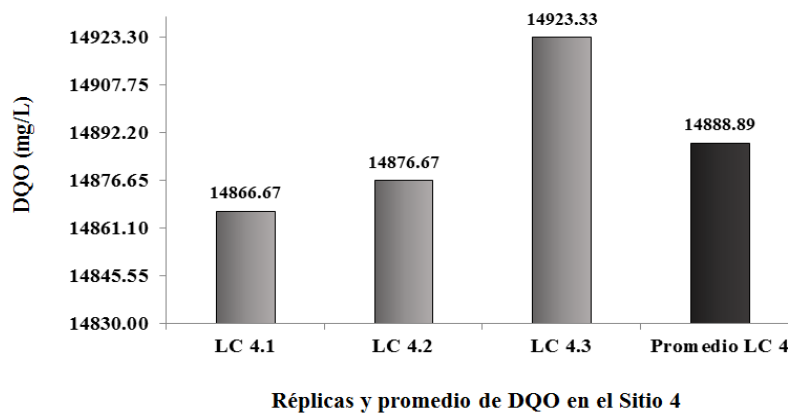


Figura 5.25. Concentración de la DQO en el sitio Lag4 de la laguna de lixiviados y el promedio del sitio Lag4.

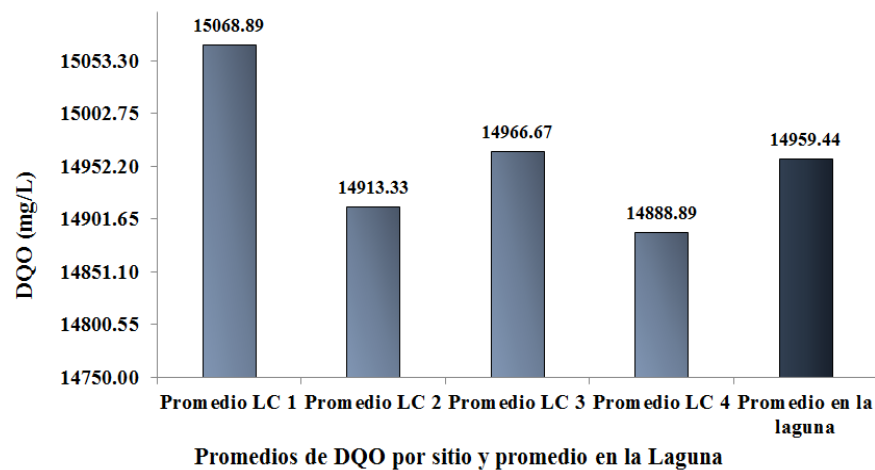


Figura 5.26. Concentración de los promedios de la DQO en cada sitio de la laguna y el promedio general en la Laguna.

Se observa que en el sitio 1 de la figura 5.26 de promedios se presentó un ligero mayor valor en la concentración del lixiviado que en los otros sitios, pero en general las diferencias son muy pocas de sitio a sitio

5.4 Resultado del tratamiento de los lixiviados por el proceso Fenton

5.4.1 Ajuste del pH a los lixiviados crudos y determinación de la DQO

Se procedió a efectuar un ajuste del pH en los lixiviados de cada sitio para preparar cada uno a la reacción de Fenton, considerando la experiencia de Zamora, (2014), la cual indica que, en la reacción de Fenton, al estar involucrado el Fe^{2+} y la generación de radicales libres, el pH ácido es muy importante, el cual debe permanecer entre 2 y 4, por lo que, siguiendo esta experiencia, se decidió trabajar también en el punto medio, con el objetivo de que no precipite el Fe^{2+} .

El pH de cada lixiviado se ajustó a un valor de 3 ± 0.144 , para esto se utilizaron 0.009 ± 0.00045 mL de H_2SO_4 (concentrado) por cada 1 mL de lixiviado crudo. En las figuras 5.27, 5.28, 5.29 y 5.30, se presentan las concentraciones de DQO en mg/L, que resultaron después de la acidificación. En el caso del sitio 1 hubo una reducción de 3,282.22 mg/L de la DQO, equivalente a 21.78% de disminución de la DQO.

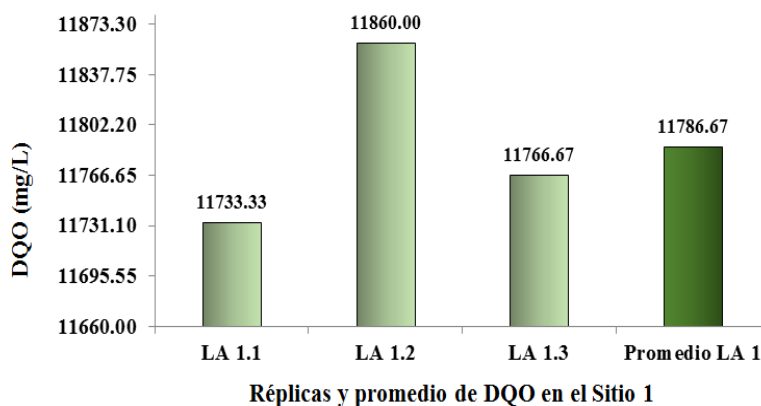


Figura 5.27. Resultados de la DQO de los lixiviados del sitio 1 después del ajuste del pH.

Para el sitio 2, la distribución fue de 3,197.77 mg/L, es decir un 21.44 %.

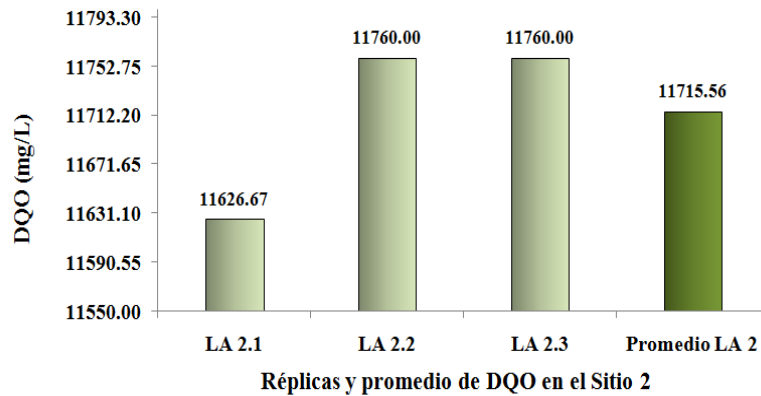


Figura 5.28. Resultados de la DQO de los lixiviados del sitio 2 después del ajuste del pH.

En el caso del sitio 3, la pérdida de DQO fue de 3,084.45 mg/L con un porcentaje del 20.61% de disminución.

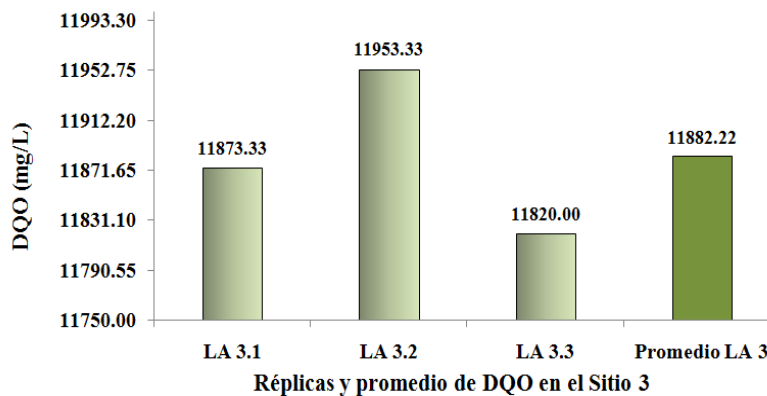


Figura 5.29. Resultados de la DQO de los lixiviados del sitio 3 después de pH.

Finalmente, para el sitio 4 la pérdida fue de 3,124.45 mg/L con un porcentaje de 20.99%.

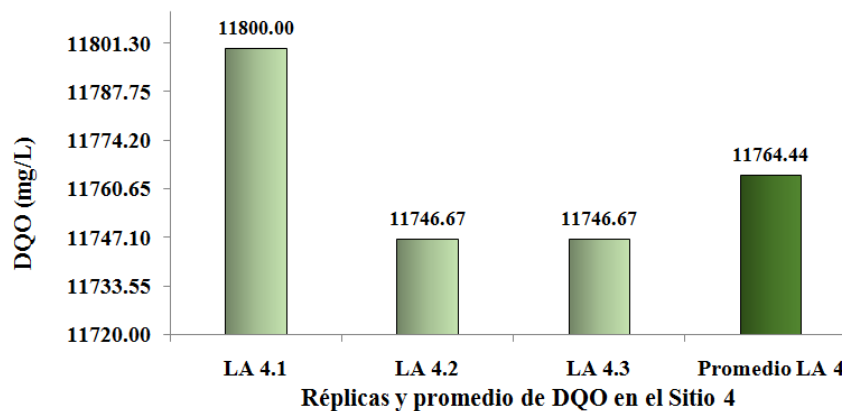


Figura 5.30. Resultados de la DQO de los lixiviados del sitio 4 después del ajuste del pH.

En la figura 5.31, se presenta el promedio general de la DQO en la laguna a través de los promedios de cada sitio. Si se considera el valor promedio final de la laguna en función de los promedios de cada sitio, se tiene una disminución general de 3172.22 mg/L que equivale a un 21.21% de degradación del lixiviado. En el paso de acidificación mediante el H_2SO_4 , éste puede estar degradando gran parte del material carbonáceo presente en el lixiviado crudo. La degradación que dicho ácido logró sobre la materia orgánica se debe al SO_3 presente en el ácido concentrado, donde este óxido actúa como oxidante fuerte, con un potencial $E^\circ = +0.20$ V.

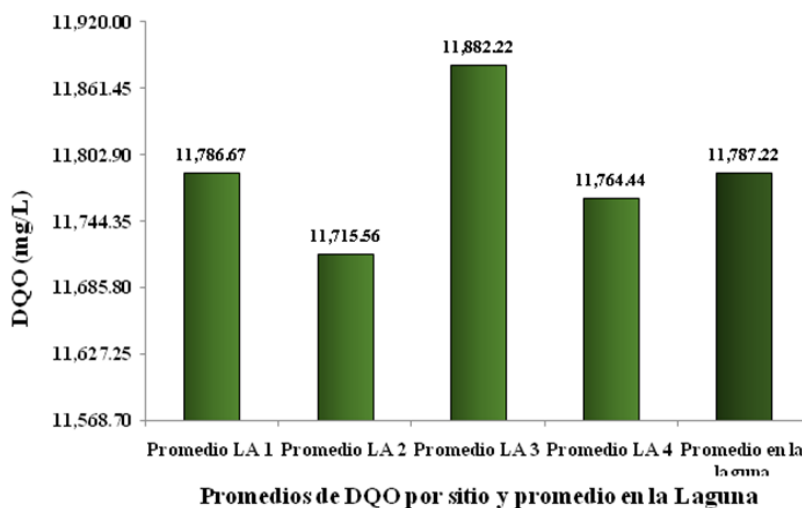


Figura 5.31. Resultados de las DQO promedio de los lixiviados y del promedio de la laguna después del ajuste del pH.

5.4.2 Oxidación de los lixiviados después del ajuste del pH mediante la reacción de Fenton

En esta sección se presenta por cada sitio la degradación de la DQO mediante oxidaciones por el proceso Fenton, una vez ajustado el pH en cada caso. En las figuras 5.32, 5.33, 5.34 y 5.35, se indica por cada sitio la disminución de la DQO.

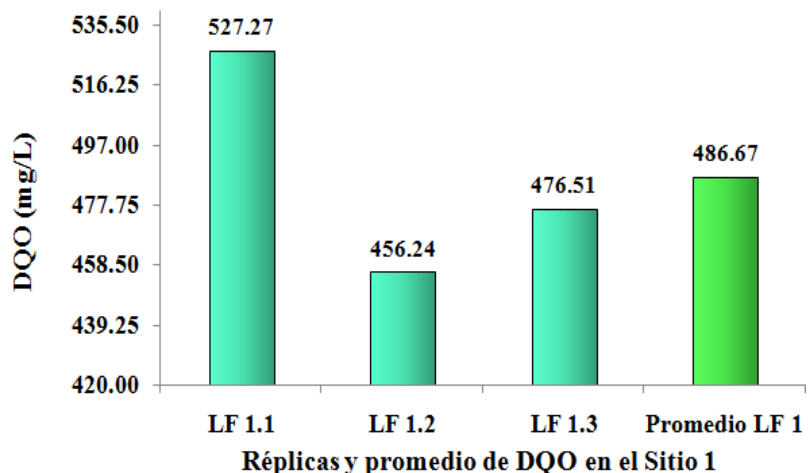


Figura 5.32. Resultados de la DQO de los lixiviados del sitio 1 después de la oxidación Fenton.

Por ejemplo, en la figura 5.32 del sitio uno, se presentan los valores de cada muestra y el promedio de la DQO restante después de la oxidación por Fenton, se obtuvo un promedio de 486.67 ± 36.06 . El valor promedio de disminución con respecto al lixiviado crudo fue de 14582.22 mg/L , con un porcentaje de 96.77% y con respecto al lixiviado acidulado de fue de 1300.00 mg/L con un porcentaje de disminución de 95.87% . En la figura 5.33, del sitio 2, se presentan los valores de cada muestra y el promedio, con un valor de 663.33 ± 3.61 después de la oxidación por Fenton.

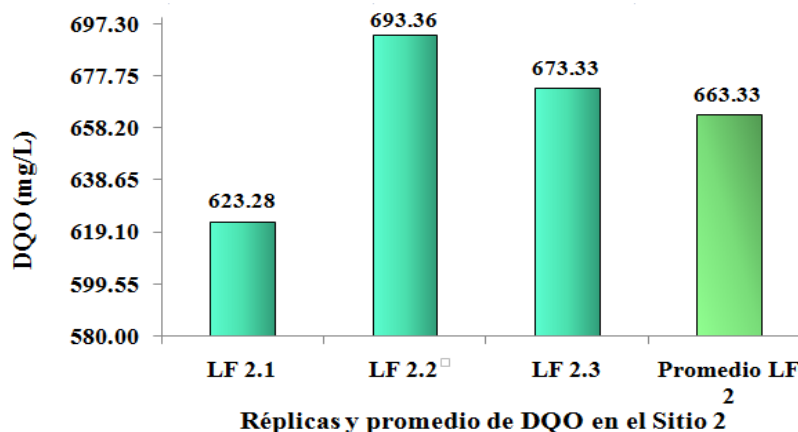


Figura 5.33. Resultados de la DQO de los lixiviados del sitio 2 después de la oxidación Fenton.

Siguiendo el procedimiento del sitio uno, se tiene una disminución de la DQO de 14250.00 mg/L con un porcentaje del 95.55% respecto al lixiviado crudo y con respecto al acidulado la disminución fue 11052.22 mg/L con un porcentaje de 94.34% . Respecto al sitio 3 se indican los valores obtenidos de la DQO restante después de la oxidación por Fenton con un promedio de 440.00 ± 3.51 .

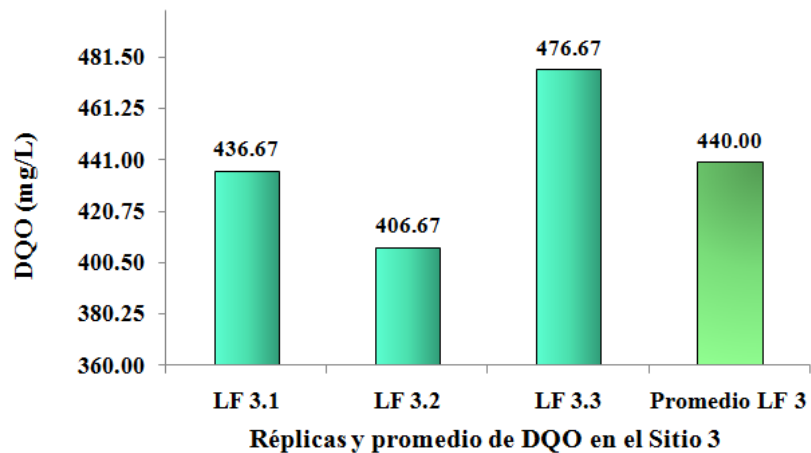


Figura 5.34. Resultados de la DQO de los lixiviados del sitio 3 después de la oxidación Fenton.

Se obtuvo una disminución de la DQO de 14526.67 mg/L con un porcentaje del 97.06 % respecto al lixiviado crudo y con respecto al acidulado la disminución fue 11442.22 mg/L con un porcentaje de 96.30 %. Para el sitio 4, en la figura 5.35, se indican los valores para cada muestra y el promedio de disminución, esta fue igual a 454.44 ± 3.85 . Siguiendo el mismo procedimiento de los sitios anteriores, se tiene una disminución de la DQO de 14434.44 mg/L con un porcentaje del 96.95% respecto al lixiviado crudo y con respecto al acidulado la disminución fue 11310.00 mg/L con un porcentaje de 96.14 %.

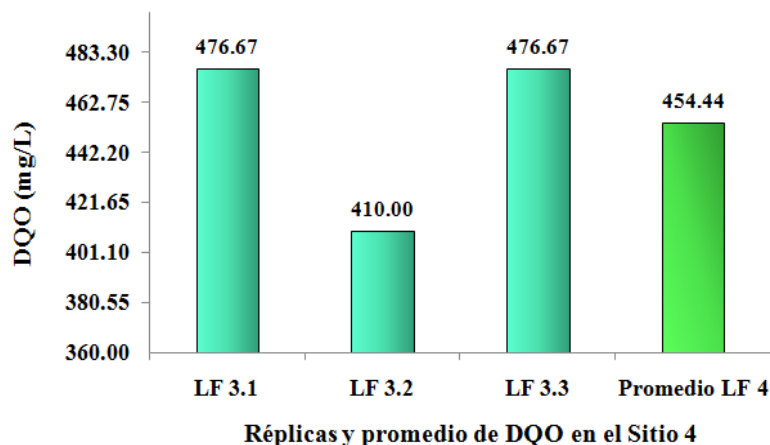


Figura 5.35. Resultados de la DQO de los lixiviados del sitio 4 después de la oxidación Fenton.

En la figura 5.36, se presenta el promedio de la DQO del proceso Fenton en la laguna en función de los promedios de cada sitio con un valor de 511.11 ± 3.64 mg/L de lixiviado oxidado. Se observa que el sitio 3 (LF3) fue el que más disminuyó, seguido de sitio 4 (LF4), siendo el sitio 2 el que menos se degradó, si se considera el promedio de toda la laguna, hubo una disminución igual a 14448.33 mg/L con un porcentaje igual al 96.58 %, respecto al lixiviado crudo y una disminución igual a 11276.11 mg/L con respecto al acidulado con un porcentaje de 95.66%.

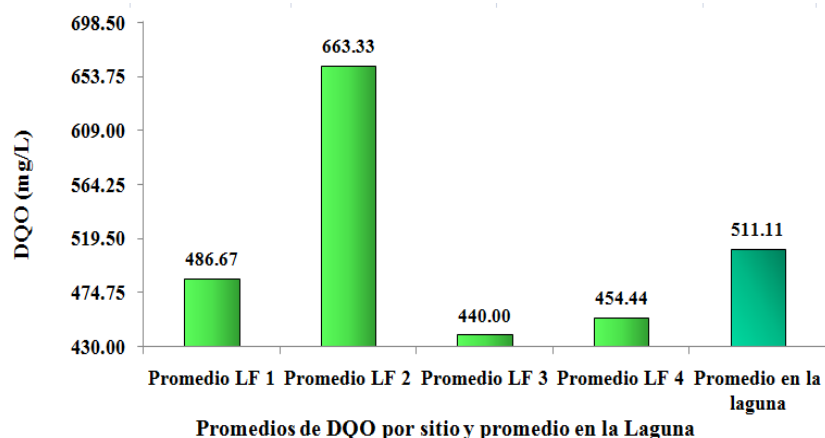


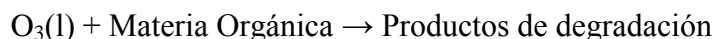
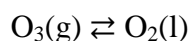
Figura 5.36. Resultados de las DQO promedio de los lixiviados y del promedio del promedio de la laguna después de la oxidación Fenton.

5.5 Resultados del tratamiento de los lixiviados por ozono (O₃)

5.5.1 Oxidación por Ozono (O₃) de los lixiviados previamente tratados por Fenton

En esta sección se presentan los resultados de la oxidación de los lixiviados de cada sitio de la laguna, tratados previamente por el proceso Fenton, seguido de una oxidación por ozono y UV por separado. Se obtuvieron las curvas de la cinética de degradación considerando la forma de la curva cinética a través de la relación C_i/C_o vs tiempo y la curva cinética de orden uno $\ln C_i/C_o$ vs tiempo. En las figuras 5.37a y 5.37b, 5.38a y 5.38b, 5.39a y 5.39b, 5.40a y 5.40b, se presentan estas relaciones.

Si se considera primero la relación C_i/C_o vs tiempo para cada sitio, el orden cero se justifica si la concentración de los reactantes permanece constante o cuasi constante a lo largo del periodo de medición. En el caso de la ozonación de los lixiviados, se puede asegurar que la concentración del ozono permanece constante, ya que éste se consume durante la degradación de la materia orgánica. Hay que considerar que el ozono reacciona en el medio después de que se disuelve, según las reacciones:



El O₃ ataca siempre a los dobles enlaces. Como los lixiviados estudiados son de color muy oscuro, se intuye la presencia de material húmico que se origina por la descomposición bacteriana de la materia orgánica.

En las cinéticas se justifica el orden cero por la linealidad de las curva C_i/C_o vs tiempo, Figuras 5.34a, 5.35a, 5.36a y 5.37a, donde la ecuación de orden cero es (ecuación 5.1).

$$C_i = C_o - kt$$

Ecuación 5.1

O también según la ecuación 5.2.

$$C_i/C_o = 1 - kt,$$

Ecuación 5.2

Trazo que se observa en prácticamente todas las curvas cinéticas. Sin embargo, en estas curvas se nota un cambio de pendiente al avanzar la reacción, lo que puede ser originado por el consumo de la materia oxidable.

Por otro lado, también se nota una buena aproximación al orden uno en la curva logarítmica, ecuación 5.3 de las figuras 5.37b, 5.38b, 5.39b y 5.40b:

$$C_i = C_o e^{(-kt)}$$

Ecuación 5.3

Esta relación también se puede representar según la ecuación 5.4.

$$\ln C_i/C_o = -kt$$

Ecuación 5.4

Sitio 1

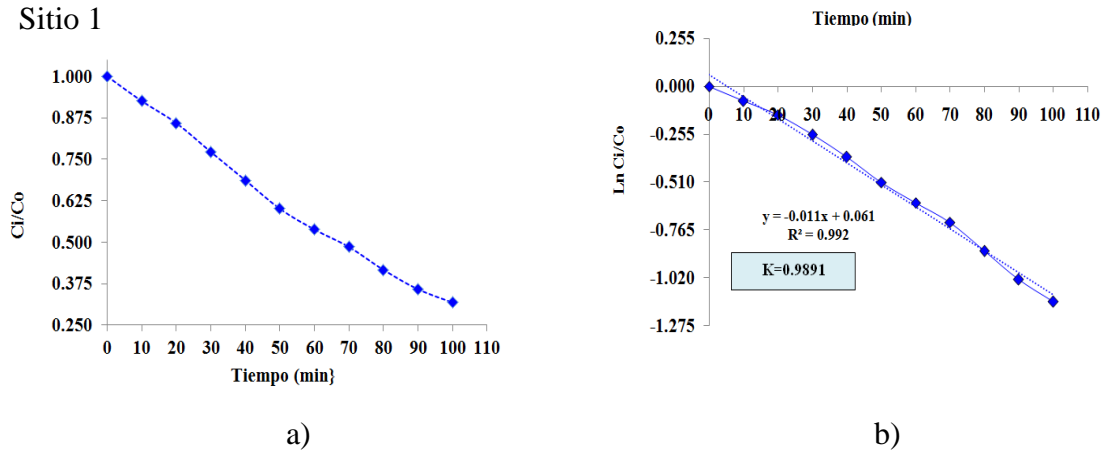


Figura 5.37. Gráficas de las cinéticas de la degradación por ozonación del lixiviado (Sitio 1).

Sitio 2

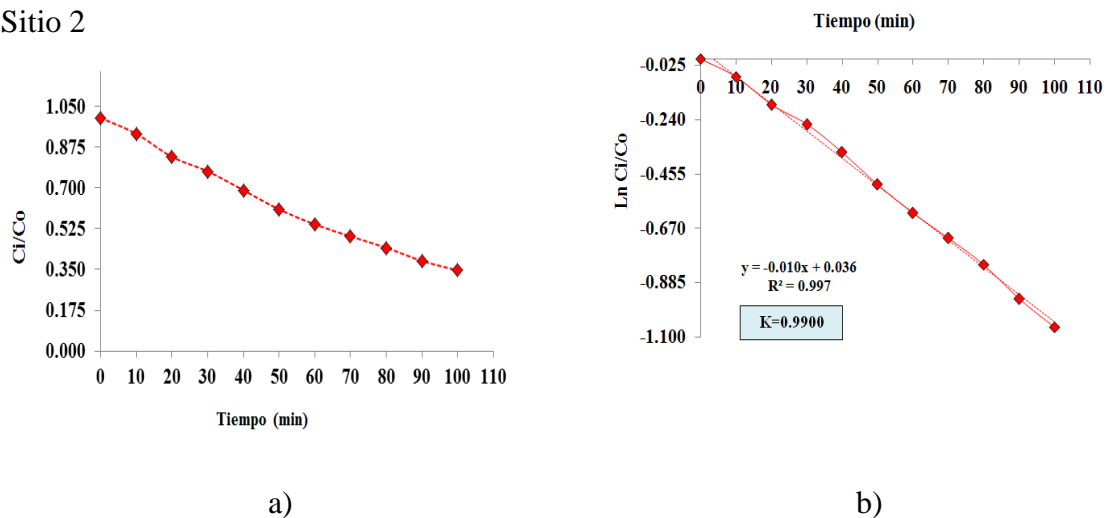
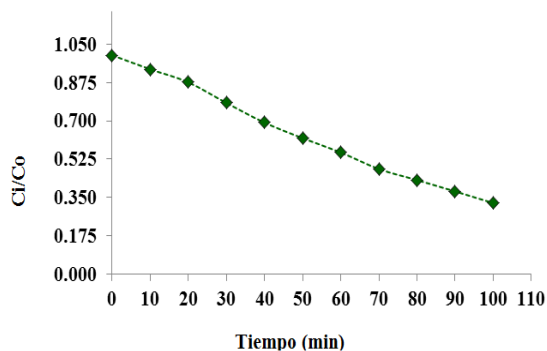
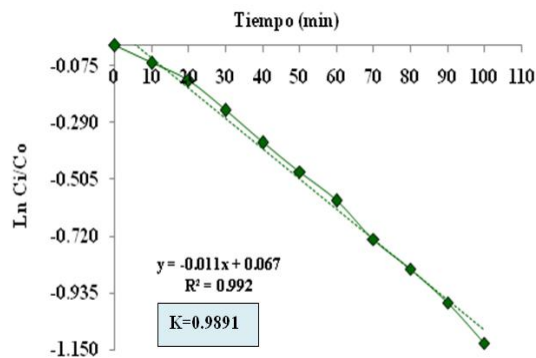


Figura 5.38. Gráficas de las cinéticas de la degradación por ozonación del lixiviado (Sitio 2).

Sitio 3



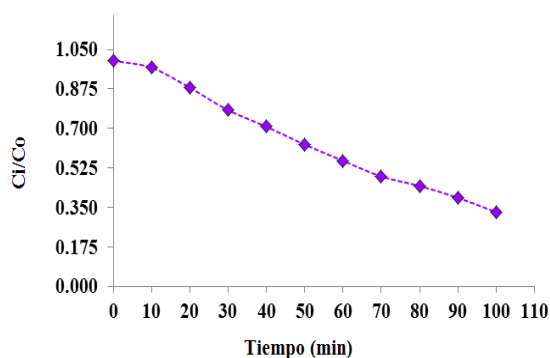
a)



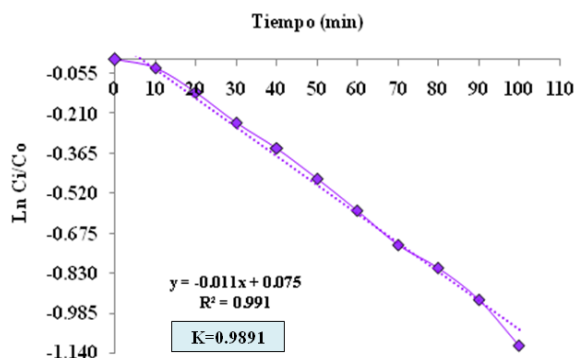
b)

Figura 5.39. Gráficas de las cinéticas de la degradación por ozonación del lixiviado (Sitio 3).

Sitio 4



a)



b)

Figura 5.40. Gráficas de las cinéticas de degradación por ozonación del lixiviado (Sitio 4).

Si se toma en cuenta que las reacciones avanzan durante un lapso mayor que dos medias vidas, se debe entender que el orden encontrado es un orden verdadero, aunque hay que tomar en cuenta que el sustrato es muy complejo. Es probable que al inicio la reacción sea la degradación de la materia más susceptible, la que tiene dobles enlaces $C=C$, $C=O$ y luego las moléculas lábiles ante el ozono.

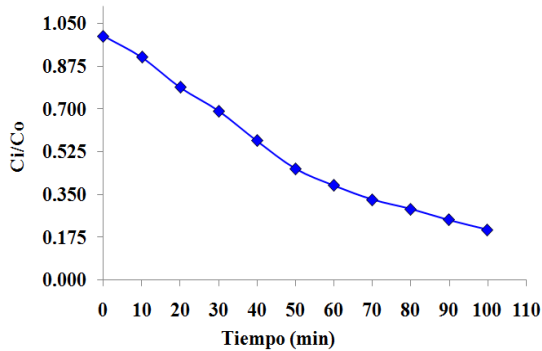
5.6 Resultado del tratamiento de los lixiviados por Radiación UV

5.6.1 Complementación de la oxidación de los lixiviados por radiación UV

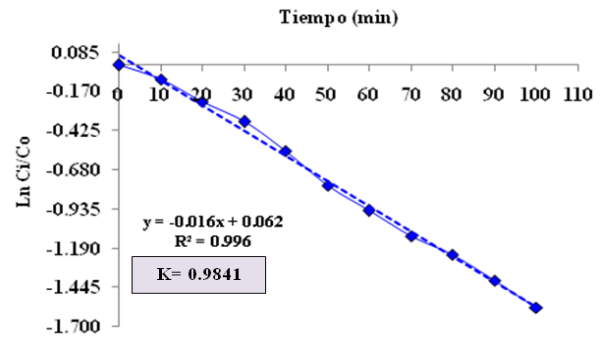
Una vez tratados los lixiviados por ozonación, se procedió a irradiarlos por UV, en este caso se observa que las curvas C_i/C_o presentan una tendencia hacia la forma típica de las

cinéticas de orden uno, ver las figuras 5.41a, 5.42a, 5.43a y 5.44a. En las figuras 5.41b, 5.42b, 5.43b y 5.44b, a su vez se indican las gráficas logarítmicas de las cinéticas de degradación de los lixiviados de cada sitio.

Sitio 1



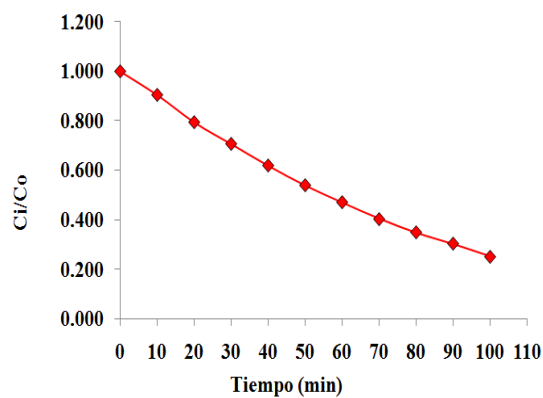
a)



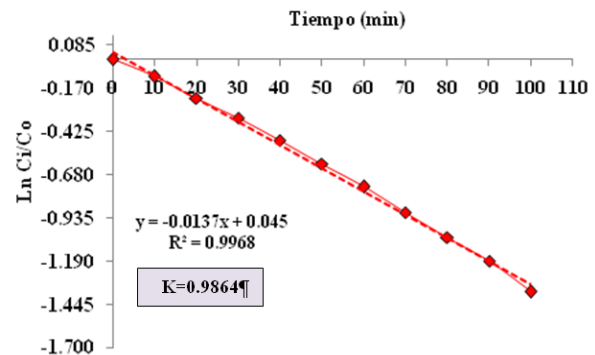
b)

Figura 5.41. Gráficas de las cinéticas de la degradación UV del lixiviado (Sitio 1).

Sitio 2



a)



b)

Figura 5.42. Gráficas de las cinéticas de la degradación por UV del lixiviado (Sitio 2).

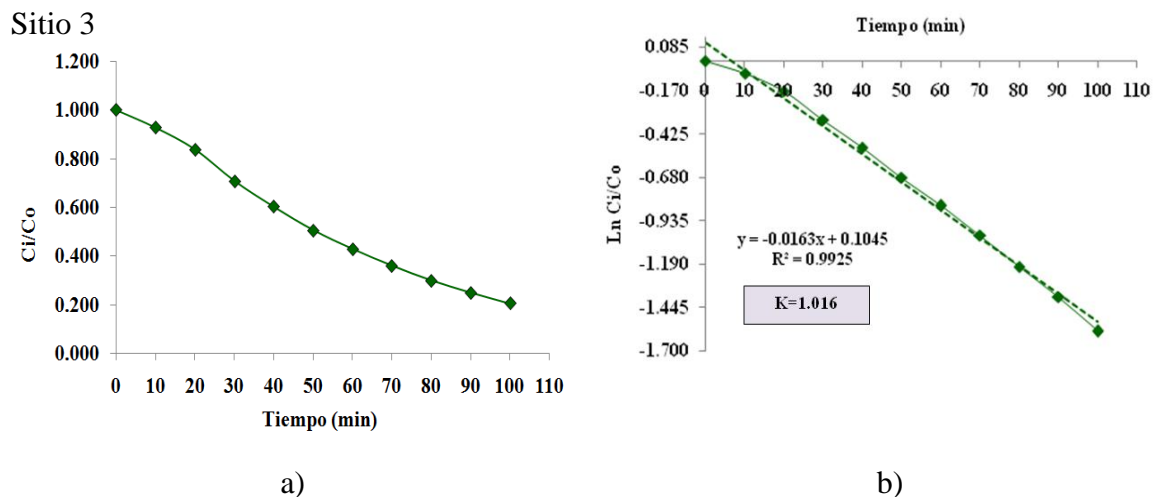


Figura 5.43. Gráficas de las cinéticas de la degradación por UV del lixiviado (Sitio 3).

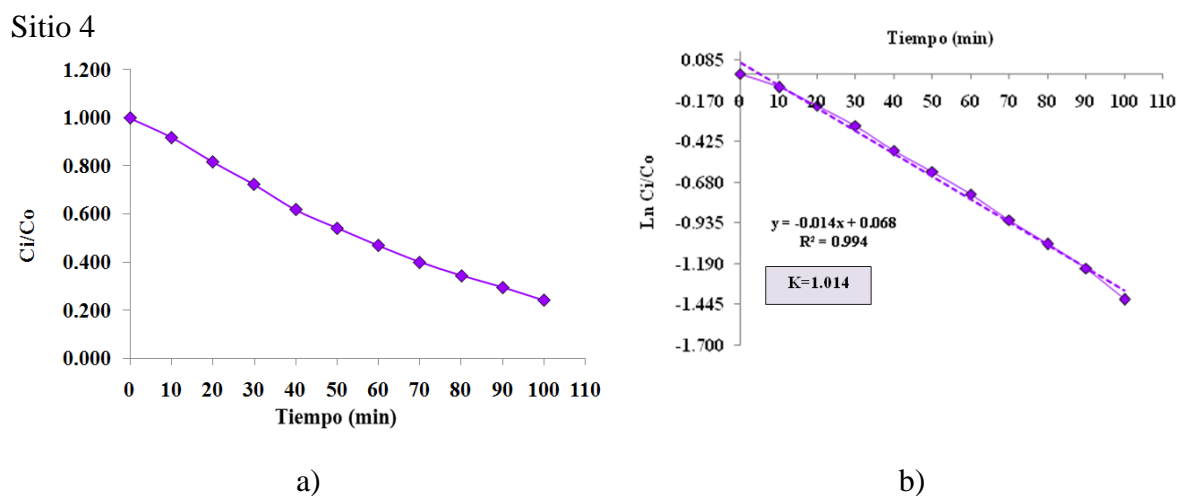


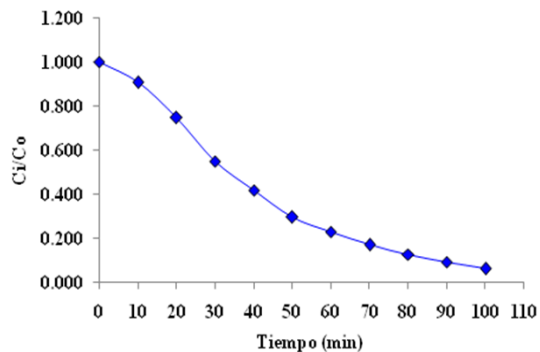
Figura 5.44. Gráficas de las cinéticas de la degradación por UV del lixiviado (Sitio 4).

5.7 Resultado del tratamiento de los lixiviados previamente tratados por Fenton combinando Ozono y UV

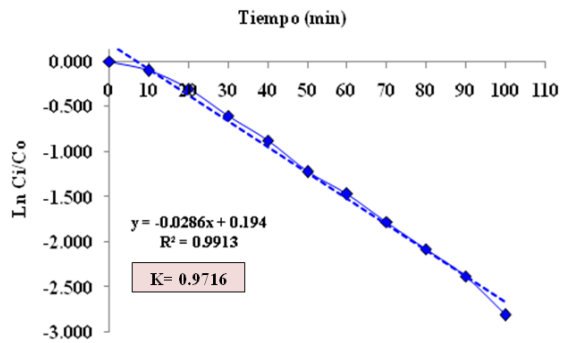
En las figuras 5.45a, 5.46a, 5.47a y 5.48a, en el proceso combinado Ozono-UV, llevados simultáneamente a cabo, después del tratamiento por el Fenton se puede notar por la forma de la curva, que la cinética es de orden uno, si se compara con la forma de la curva del caso anterior donde se efectuó cada tratamiento por separado la cinética que predomina es el proceso por UV. En cuanto al proceso de degradación, prácticamente lo mismo debe decirse de las reacciones con O₃ + luz UV. La acción de la luz ultravioleta es la de "activar" a los dobles enlaces:



Sitio 1



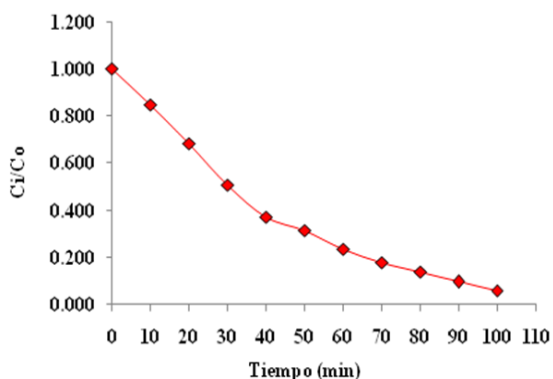
a)



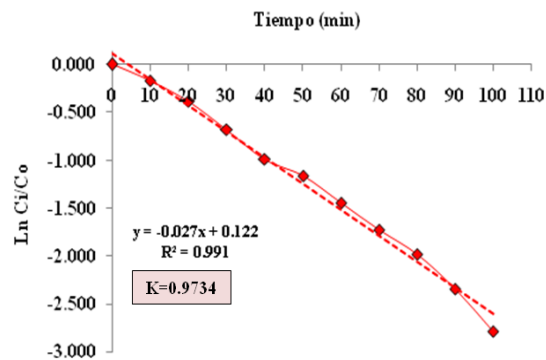
b)

Figura 5.45. Gráficas de las cinéticas de la degradación por Ozono-UV del lixiviado (Sitio 1).

Sitio 2



a)



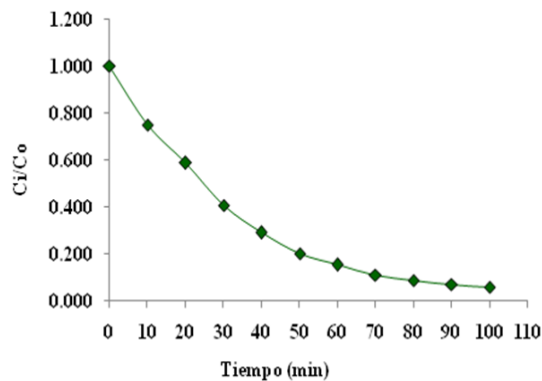
b)

Figura 5.46. Gráficas de las cinéticas de la degradación por Ozono-UV del lixiviado (Sitio 2).

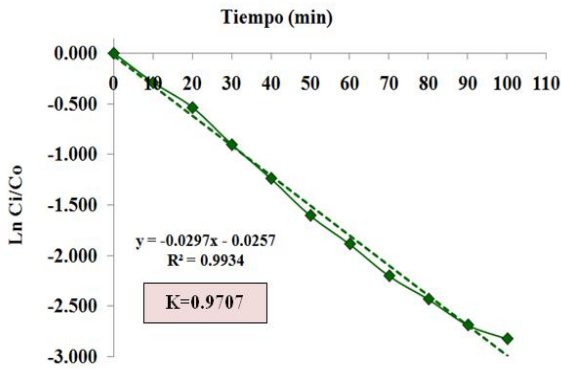
En las figuras 5.45b, 5.46b, 5.47b y 5.48b se muestran las gráficas logarítmicas donde la constantes K resultaron ligeramente menores que en los casos de los tratamientos Ozono y UV por separado, sin embargo, el orden de magnitud no cambió.

En este caso si bien no hubo una diferencia muy grande en cuanto a las concentraciones, si hubo un ahorro en tiempo de experimentación, por un lado y menor error experimental por el manejo de las muestras, ya que no se llevaron de la oxidación del ozono al reactor de UV, sino que en una sola en una sola exhibición se realizó la ozonación-UV después de la oxidación Fenton.

Sitio 3



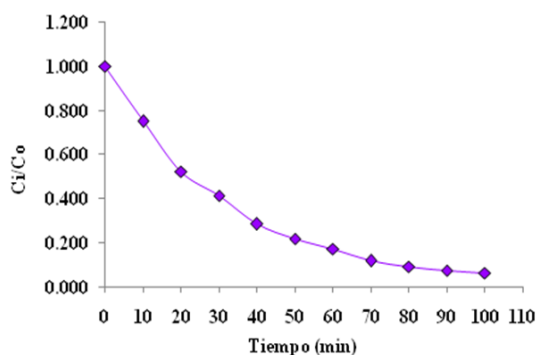
a)



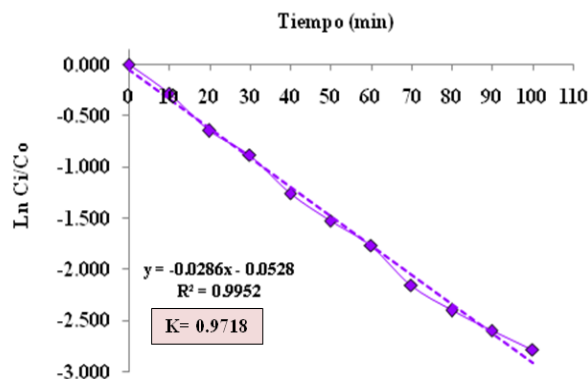
b)

Figura 5.47. Gráficas de las cinéticas de la degradación por Ozono-UV del lixiviado (Sitio 3).

Sitio 4



a)

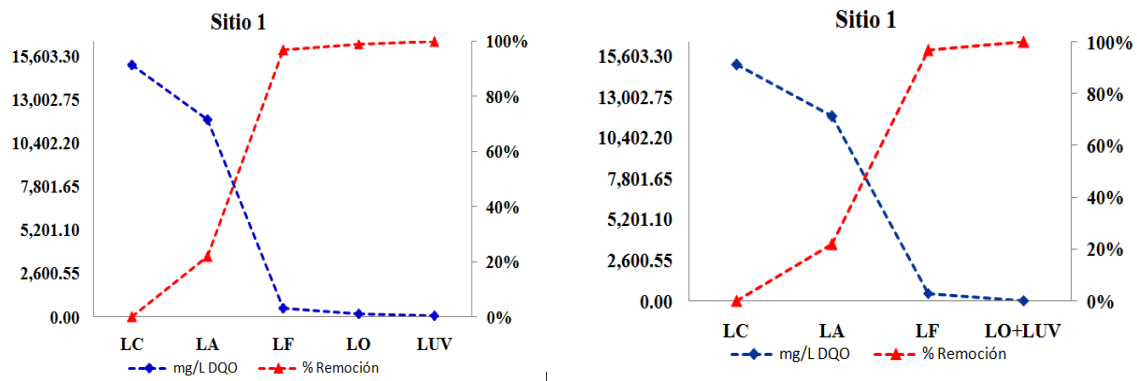


b)

Figura 5.48. Gráficas de las cinéticas de la degradación por Ozono-UV del lixiviado (Sitio 4).

5.8 Obtención del rendimiento y su comparación de las oxidaciones Ozono y UV, con Ozono-UV de los lixiviados previamente tratados por Fenton

En esta sección se analizó, por un lado, el rendimiento de cada proceso y por otro al compararlos, poder seleccionar mejor la metodología más que conviene. En las figuras, 5.49a y 5.49b, se presentan, tanto la concentración (gráfica de color azul) como el rendimiento (gráfica de color rojo), se observa en la figura 5.49b del proceso combinado el ahorro de un paso. Se puede observar también en ambos casos que la oxidación Fenton fue la más eficiente ya que se logró tanto la mayor concentración de degradación como el mayor porcentaje de este.



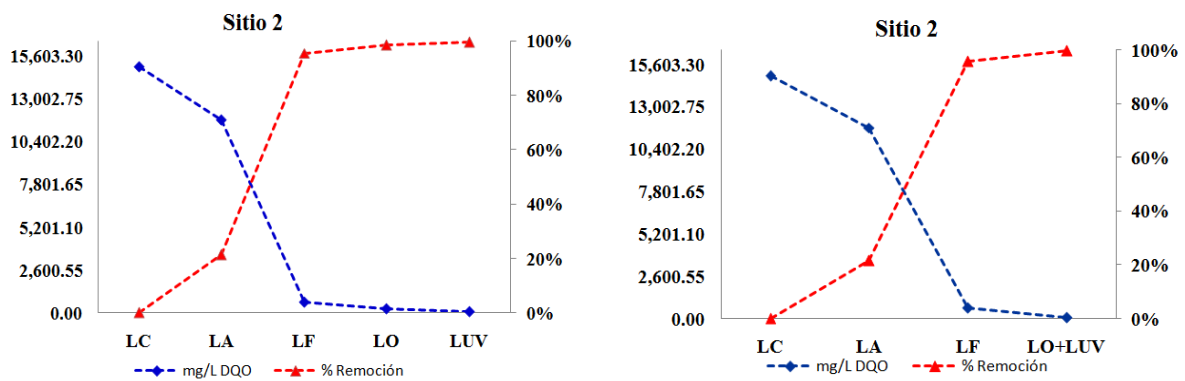
a) Ozono y UV independientes

b) Ozono-UV combinados

Figura 5.49. a). Gráficas del rendimiento de los procesos Ozono y UV independientes.

b) Gráficas de los procesos combinados y simultáneos Ozono-UV (Sitio 1).

De la misma forma en las siguientes figuras 5.50a y 5.50b, 5.51a y 5.51b, 5.52a y 5.52b, el comportamiento fue el mismo.

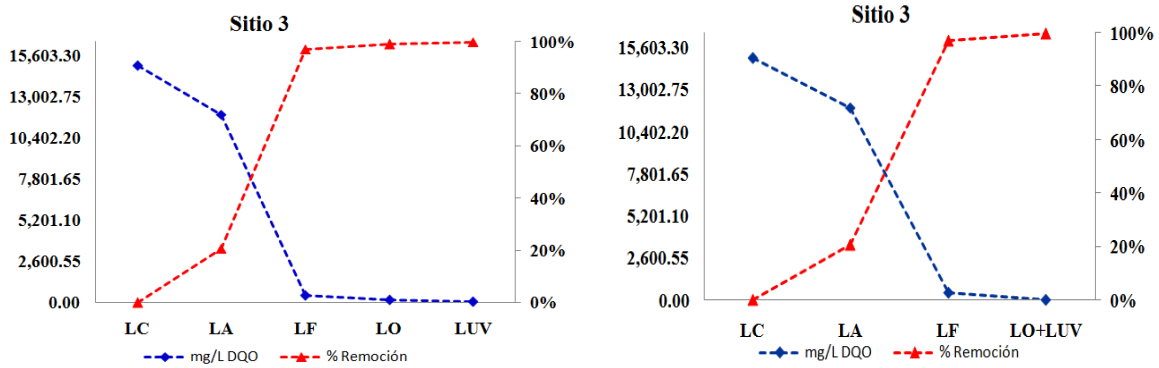


a) Ozono y UV independientes

b) Ozono-UV combinados

Figura 5.50. a) Gráficas del rendimiento de los procesos Ozono y UV independientes.

b) Gráficas de los procesos combinados y simultáneos Ozono-UV (Sitio 2).



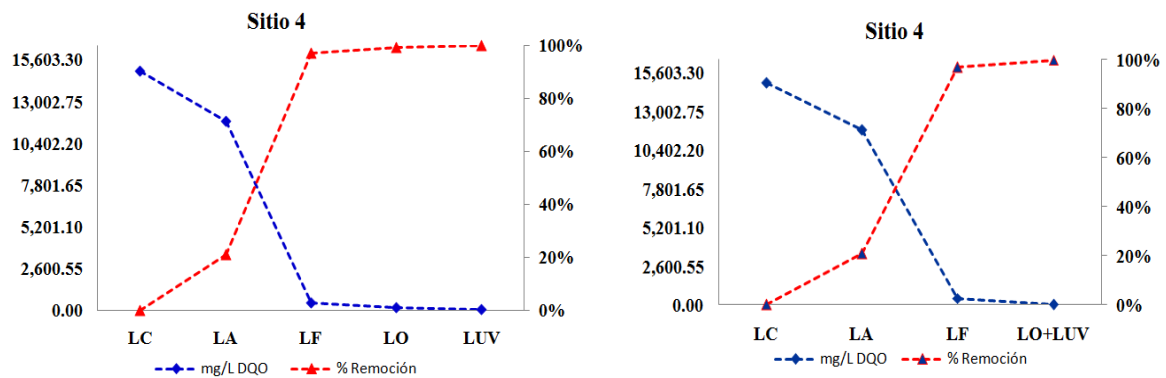
a) Ozono y UV independientes

b) Ozono-UV combinados

Figura 5.51. a). Gráficas del rendimiento de los procesos Ozono y UV independientes.

b) Gráficas de los procesos combinados y simultáneos Ozono-UV (Sitio 3).

Se puede llegar a la conclusión de vale la pena de llevar a efecto la oxidación ozono-UV simultáneamente.



a) Ozono y UV independientes

b) Ozono-UV combinados

Figura 5.52. a). Gráficas del rendimiento de los procesos Ozono y UV independientes.

b) Gráficas de los procesos combinados y simultáneos Ozono-UV (Sitio 4).

5.9 Análisis de los lixiviados por Espectroscopía Infrarroja

A continuación, en las figuras 5.53a, 5.53b y 5.53c, se presentan los infrarrojos de cada lixiviado.

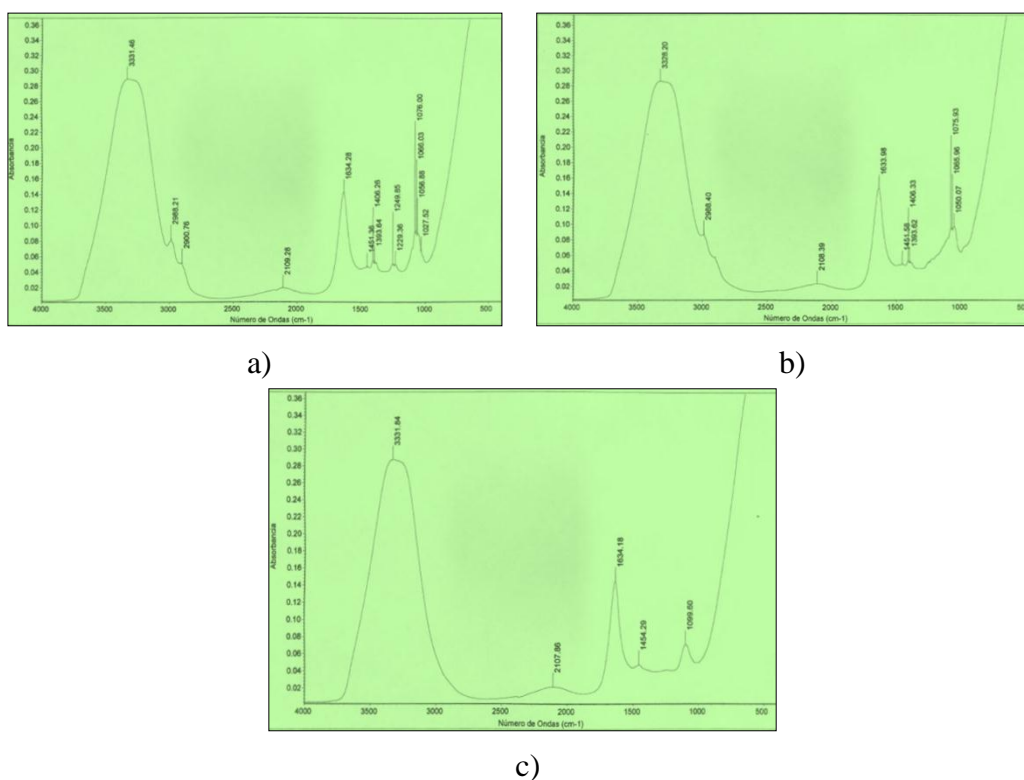


Figura 5.53. a) Espectro de IR del LC, b) Espectro de IR del LA y c) Espectro IR del LF

Se preparó una muestra compuesta de los sitios tanto en el lixiviado crudo (LC), como los ajustados a pH= 3-4, y los tratados por Fenton. Para ello se secaron en la estufa a 50°C, hasta que quedó un polvo en cada caso y se determinó su IR, en las siguientes figuras se presentan los IR para cada caso. Se observa cómo fueron desapareciendo picos después de cada tratamiento. En la siguiente tabla se indican los valores del número de onda para cada uno de los picos de cada etapa del tratamiento.

Tabla 5.1. Grupos funcionales presentes en cada etapa del tratamiento del lixiviado.

| Número de onda (cm ⁻¹) | LC | LA | LAO |
|--|---|--|--|
| 3331.38 (3500-2700) | N-H O-H C-H | N-H O-H C-H | N-H O-H C-H |
| 2988.4 (3500-2700) | | | N-H O-H C-H |
| 2900.76 (3500-2700) | | | N-H O-H C-H |
| 2108 | CEC CEN | CEC CEN | CEC CEN |
| 1633.99 Ac. Carboxílicos junto con una en (3400-2400) | Amida Ac. Carboxílico CEC C=O C=N | Amida Ac. Carboxílico CEC C=O C=N | Amida Ac. Carboxílico CEC C=O C=N |
| 1454.29 | CEC de aromático | CEC de aromático | |
| 1406.33 (1400-600) | | Amida Ac. Carboxílico CEC C=O C=N | |
| 1393.62 (1400-600) | | | |
| 1293.69 (1250-1300) | | | C-O Ac. Carboxílico |
| 1359.88 (1400-600) | C-C C-O C-N | | |
| 1108.60 Fluoroalcano (1000- 1100) Esteres (1300-1000) | | | |
| 1099.60 Fluoroalcano (1000- 1100) Esteres (1300-1000) | | C-X de Fluoroalcanos o esteris | |

En la tabla 5.1, se muestra la aparición desaparición de picos representativos de grupos funcionales. Existen tres picos que permanecen en el lixiviado crudo (LC), y en el ajustado con H₂SO₄ a pH= 3-4 (LA) y el oxidado (LAF), cuyos valores fueron 3331.38, 2108 y 1633.99 cm⁻¹. En el LA se observa la desaparición de picos, pero en el LF que ya ha sido oxidado, se observa la aparición de más picos. En la etapa de oxidación aparecieron gran cantidad de picos, debido probablemente a la fragmentación de moléculas de gran tamaño.

Capítulo 6
Conclusiones y
Recomendaciones

Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

A continuación, se concluye en función de los resultados que:

1. Para lixiviados ya estabilizados (aquellos que presenta un pH arriba de 8) la composición es más compleja, ya que presentan compuestos recalcitrantes de difícil degradación por lo que es necesario utilizar oxidaciones muy fuertes como es el caso del proceso Fenton, donde se observó que en el caso de los lixiviados de este proyecto tuvo en promedio una eficiencia prácticamente de un 80%.
2. En el proceso de oxidación del lixiviado es crucial que el pH se ajuste a valores de entre 2 y 4, se optimice la relación de reactivos Fenton $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$, de no optimizar dicha relación puede existir un exceso de Fe^{2+} y que este precipite con el $HO\cdot$ y formar un coloide de $Fe(OH)_2$, que con el de $Fe(OH)_3$, de la oxidación del Fe^{2+} de la reacción de Fenton, actúan como superficies adsorbentes y pueden enmascarar la determinación de componentes orgánicos del lixiviado. Parece que es el Fe^{2+} debe de ser el reactivo limitante de la reacción.
3. Una vez lograda la primera oxidación mediante el proceso Fenton, se procedió por dos caminos, el primero fue una oxidación con ozono seguida de una radiación por UV y el segundo un proceso en solo paso combinando ozono y UV. Ambos caminos dieron un buen rendimiento ya que se completó la degradación del material orgánico de los lixiviado, la ventaja del segundo método fue el de ganar tiempo de la experimentación y evitar errores experimentales al manipular menos veces las muestras.
4. En cuanto a las cinéticas mediante el ozono y UV, en el primer caso, aparentemente se justificó un orden cero por la linealidad de las curva C_i/C_o vs tiempo, ya que se observó un trazo de esta cinética en prácticamente todas las curvas. Sin embargo, en estas curvas se notó un cambio de pendiente al avanzar la reacción, lo que puede ser originado por el consumo de la materia oxidable, donde en los demás puntos también se notó una buena aproximación al orden uno en la curva logarítmica, dando buenos valores de la constante cinética K para el orden uno.

En cuanto a las cinéticas en el de las radiaciones con UV, se observó que las curvas C_i/C_o presentaron prácticamente curvas cinéticas de orden uno, con gráficas logarítmicas con buenos valores de este orden

Finalmente, para la oxidación con el sistema combinado Ozono-UV, la forma de las curvas cinéticas C_i/C_o vs tiempo presentaron las típicas formas de orden uno, donde en las curvas logarítmicas predominaron las cinéticas de degradación de las radiaciones UV, donde la acción de la luz ultravioleta puede estar "activando" a los dobles enlaces. Las constantes K fueron en general ligeramente menores, pero en el mismo orden de magnitud.

6.2 Recomendaciones

Se indican a continuación algunas recomendaciones que por situación de la pandemia que han afectado al país no se pudo lograr:

- 1- Efectuar uno o más muestreos para tener más certeza en el comportamiento de la laguna.
- 2- Efectuar análisis de nitrógeno total y amoniacal, ya que parece que los lixiviados están estabilizados, pues presentaron pH's mayores de 8, lo que indica que exista material carbonáceo recalcitrante donde la anaerobiosis genera nitrógeno como nitritos y/o nitrógeno amoniacal.
- 3- Es importante también medir metales como Na, K, Ca y Mg, principalmente por la alta conductividad que se detectó en este trabajo.
- 4- Es recomendable también que se efectúen análisis por IR después de las oxidaciones por Ozono y UV.

Referencias

Referencias

- Agroptima Blog. (2020).** *La Revolución verde*. Consultado 16 de diciembre de 2020: <https://www.agroptima.com/es/blog/la-revolucion-verde/>
- Amokrane, A., Comel, C. y Veron, J. (1997).** Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water Research*, 31, 2775-2782.
- ASTM. (1996).** ASTM D1498-14, *Standard Test Method for Oxidation Reduction Potential of Water*. ASTM, USA.
- ASTM. (2009).** ASTM-D7573-09, *Standard Test Method for Total Carbon and Organic Carbon in Water by High Temperature Catalytic Combustion and Infrared Detection*. ASTM, USA.
- Aziz, S.Q., Aziz, H.A., Yusoff, M.S., Bashir, M.J.K., Umar, M. (2010).** Leachate characterization in semi-aerobic and anaerobic sanitary landfills: A comparative study. *Journal of Environmental Management* 91, 2608-2614.
- Bandala, E., Corona, B., Guisar, R., Uscanga, M. (2007).** Aplicación de Procesos Avanzados de Oxidación en la Desactivación Secuencial de Microorganismos Resistentes en Agua. *Ciancia... Ahora* 20:52-63
- Barbusinski K. (2009).** Fenton Reaction Controversy concerning the chemistry. *Ecological Chemistry*. 16 (3) 347-358
- Barceló, I., Solís, H., Aceves, H., López, E., Méndez, R., García, J., Guzmán, R. (2011).** Optimización de la relación Fe^{2+}/H_2O_2 en el proceso de oxidación de lixiviados de un relleno sanitario y posterior adsorción. X Congreso Internacional y XVI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, Querétaro, México, agosto 17-19, 2011; Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro.
- Bódalo, A., Hidalgo, A. M., Gómez, M., Murcia, M. D. y Marín, V. (2007).** Tecnologías de tratamiento de lixiviados de vertedero (I). *INGENIERÍA QUÍMICA*, 451, 142-149.
- Bortolotto, T., Bertoldo, J.B., Zanette da Silveira, F., Defaveri, T.M., Silvano, J., Pich, C.T. (2009).** Evaluation of the toxic and genotoxic potential of landfill leachates using bioassays. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 28, 288–293
- Christen, L., Lai, C., Hartmann, B., Hartmann, P., Geddes, D. (2013).** Ultraviolet-C radiation: a novel pasteurization method for donor human milk. *PLoS One*. 8(6):e68120
- Cortez, S., Teixeira, P., Oliveira, R., Mota, M., (2010).** Fenton's Oxidation as Post-Treatment of a Mature Municipal Landfill Leachate. *IJCEE*. 2 (1), 40-43.
- Cotton A., Wilkinson G., Murillo C., Bochmann A. (1999).** *Advanced Inorganic Chemistry*, 6th. Edition. Wiley Interscience

- Delleur, J.W. (1998).** *The handbook of groundwater engineering*. 1a edición, CRC press. Indiana, U.S.A.
- Deng, Y. (2007).** Physical and oxidative removal of organics during Fenton treatment of mature municipal landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*. 146, 334-340.
- Dharmarathne, N., y Gunatilake, J. (2013).** Leachate Characterization and Surface Groundwater. *International Journal of Scientific Research*, 3 (11): 1-7.
- Droppelmann, C. V., Oettinger, M. (2009).** *Tratamiento en Lodo Activado del Lixiviado de un Relleno Sanitario*. Inf. tecnol, (20)-1, pp.11-19. ISSN 0718-0764. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642009000100003>
- Duarte, F., Hodar-Maldonado, F., Madeira, L.M. (2011).** Influence of the characteristics of carbon materials on their behaviour as heterogeneous Fenton catalysts for the elimination of the azo dye Orange II from aqueous solutions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 103(1- 2):109-115.
- Durán-Moreno, A., Hernández-Parra, J., Roth-Carranza, C., Durán-de-Bazúa, C., Frontana- Uribe, A., Ramírez-Zamora, R. (2003).** *Tratamiento de aguas residuales mixtas e industriales utilizando el reactivo de Fenton electrogenerado*. Tecnol. Ciencia Ed. 18, 10-15.
- Duran, P.A., Ramírez, Z.R.M., Duran, M.A. (2002).** Bioadsorción de lixiviados viejos clarificados. Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales de la FEMISCA, Guanajuato, Gto. pp.1-12.
- Durán, A., Ramírez, R.M. y Durán, A. (2008).** *Bioadsorción de lixiviados viejos clarificados*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Recuperado el 04 de Julio 2012, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/055.pdf>
- Ehrig, H. (1983).** Quality and quantity of sanitary leachate. *Waste Management Res.*, V 1, 53-58.
- Ehrig, H. (1984).** Treatment of sanitary landfill leachate: biological treatment. *W. Mgmt.*, V 2,131-152.
- Erkman S y Ramaswamy R. (2003).** *Applied Industrial Ecology: A New Platform for Planning Sustainable Societies*. India: Aicra, Publisher.
- Escobar, D. J. L. (2007).** *El Desarrollo Sustentable en México (1980-2007)*. Revista Digital Universitaria. Consultado el 05 de marzo de 2020, de <http://www.revista.unam.mx/vol.9/num3/art14/art14.pdf>
- García-Molina V. (2006).** *Wet oxidation processes for water pollution remediation*. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona (España)
- Gómez, J.R. (2009).** *Química Verde*. Recuperado el 06 de marzo de 2020, de http://www.izt.uam.mx/cosmosecm/QUIMICA_VERDE.html

- Grocock, N.H. (1984).** Disinfection of drinking water by ultraviolet light. *J. of the Institute of Water Engineers and Scientist*. Vol 38 (2) 163-172
- Hermosilla, D., Cortijo, M., Huang, C.P. (2009).** Optimizing the treatment of landfill leachate by conventional Fenton and photo-Fenton processes. *Sci Total Environ*. 407, 3473-3481.
- Kiss, K. G. y Encarnación, A. G. (2006).** Los productos y los Impactos de la Descomposición de Residuos Sólidos Urbanos en los Sitios de Disposición Final. *Gaceta Ecológica INE*. 79, 39-51.
- Kogelschatz, U., Eliasson, B., (1995).** *Ozone generation and applications*. Handbook of electrostatic Processes. Editado por J. Chang, A. J. Nelly y M. Crowley.
- Kulikowska, D., Klimiuk, E. (2008).** The effect of landfill age on municipal leachate composition. *Bioresource Technology* 99, 5981-5985.
- Kurniawan, T.A., Lo, W., Chan, G.Y.S. (2006).** Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials B*129, 80-100
- Kurniawan, T. A., y Lo, W. (2009).** *Removal of refractory compounds from stabilized landfill leachate using an integrated H2O2 oxidation and granular activated carbon (GAC) adsorption treatment*. Water Research, 1-13.
- Li, W., Hua, T., Zhou, Q., Zhang, S., Li, F. (2010).** *Treatment of stabilized landfill leachate by the combined process of coagulation/flocculation and powder activated carbon adsorption*. Desalination 264, 56-62.
- Loukidou, M.X., Zouboulis, A.I. (2001).** *Comparison of two biological treatment processes using attached-growth biomass for sanitary landfill leachate treatment*. Environmental Pollution 111, 273-281
- Manahan, S.E. (1994).** *Environmental Chemistry*. Sexta Edición. Lewis Publishers. USA.
- May, M.A.A. (2010).** *Optimización del proceso de adsorción de un tratamiento de lixiviados Fenton-filtración-adsorción*. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Méndez, R., Medina, E., Quintal, C., Castillo, E., Sauri, M. (2002)** Tratamiento de lixiviados con carbón Activado. *Ingeniería*, 6:19-27.
- Méndez, R., Novelo, A., Coronado, V., Castillo, E. y Sauri, M. R. (2008).** Remoción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación con aire disuelto. *Ingeniería* 12:13-19
- Mertens, P., Richelle, B., Watelet, M., Wollast, A. (1995).** Audit technique de caractérisation d'une ancienne décharge: *Composition d'un lixiviat particulier*. T.S.M. L'eau, N 6, 465- 470.

Meulemans CCE (1986). The basic principles of UV-Sterilization of water. En: *Ozone + Ultraviolet Water Treatment, Aquatec Amsterdam*. Paris: International Ozone Association, 1986. B.1.1-B1.13

Millán VD, Romero GL, Brito M, Ramos-Villarroel AY. (2015). Luz Ultravioleta: Inactivación microbiana en frutas. *Saber*, Universidad de Oriente, Venezuela. 27 (3) 454-469. ISSN: 2343-6468 Digita / ISSN: 1315-0162 Impreso / Depósito Legal pp 198702SU187

Ministerio de salud. (1997). *Disposición correcta de la basura: El Relleno Sanitario*. Departamento de Educación para la Salud. San José, Costa Rica. Consultado el 11 de diciembre de 2020: <https://www.binasss.sa.cr/poblacion/rellenosanitario.htm>

Morales G. A. (2013). *Cinética de la remoción de compuestos orgánicos por ozonación del lixiviado del relleno sanitario de Tlalnepantla de Baz en el Estado de México*. Proyecto Terminal en Ingeniería Ambiental de la UAM-Azcapotzalco.

O'Brian, W.J., Hunter, G.L., Rosson, J.J., Hulsey, R.A. and Carns, K.E (1995). Ultraviolet system design: past, present and future. En: *Proceedings Water Quality Technology Conference*, New Orleans, LA., November: 12-16. AWWA; 1995: 271-305

Obuli, P. y Kurian, J. (2007). *Bioreactor landfills for sustainable solid waste management*. Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Chennai, India, 466-473.

ONU (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. United Nations. Consultado el 10 de diciembre de 2020, de http://conspect.nl/pdf/Our_Common_Future-Brundtland_Report_1987.pdf

ONU (1992). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Consultado el 15 de junio de 2020, de http://es.wikipedia.org/wiki/Declaraci%C3%B3n_de_R%C3%ADo_sobre_el_Medio_Ambiente_y_el_Desarrollo.com

Osorio, P. J. P. (2010). *Desarrollo de un proceso de tratamiento para lixiviado por oxidación Fenton-floculación seguida por una adsorción mediante cáscara de huevo o de camarón*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México.

Pachau Z, Tiwiri R. (2008). Ultraviolet light-its effects and applications. *Sci. Vision*. 8(4) 128-136.

Parsons, S (2004). *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*. IWA, UK.

Perkowski J., Józwiak W., Kos L., Stajszczyk P. (2006). Application of Fenton's reagent in detergented detergent separation in highly concentrated water solutions. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe January*. 14:114-119.

Phillips, R (1983). *Sources and applications of ultraviolet radiation.* New York, New York: Academic Press Inc.

Primo M. O. (2008). *Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de rsu mediante procesos de oxidación avanzada.* Tesis doctoral, Cantabria, España.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2021). *Desarrollo sostenible.* Consultado: 14 de enero de 2021: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development.html>

Ramírez J.H., Maldonado F., Pérez A., Moreno C., Costa C., Madeira L.M. (2007). Azo-dye Orange II degradation by heterogeneous Fenton-like reaction using carbon-Fe catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental.* 75(3-4): 312-323.

Renou S. Givaudan JG, Poulain S, Dirassouyan F, Moulin P. (2008). Landfill leachate Treatment; Review and Opportunity. *Journal of Hazardous Materials:* 150 (3). 468-493. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.077

Rocha, E.M.R., Vilar, V.J.P., Fonseca, A., Saraiva, I., Boaventura, R.A.R. (2011). Landfill leachate treatment by solar-driven AOP's. *Solar Energy* 85, 46-56.

Rodríguez, F.A., Leton, P., Rosal, R., Dorado, M., Villa, S. y Sanz, J. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales* Fundación para el conocimiento Madrid CEIM. 51-52.

Russell R. (2010) Ultraviolet (UV) radiation. *National Earth Science Teachers Association (NESTA).* University Corporation for Atmospheric Research. USA. Consultado el 15 de marzo de 2020 en: https://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_ultraviolet.html

Scott J.P., Ollis D.F. (1995). Integration of chemical and biological oxidation processes for water treatment. Review and recommendations. *Environ Progr.* 14, 88-110.

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1980). NMX-AA-003-1980, *Norma Mexicana. Muestreo de Aguas Residuales.*

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2001). NMX-AA-079-SCFI-2001, *Norma Mexicana. Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.*

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2010). NMX-AA-026-2010, *Norma Mexicana. Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.*

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2011). NMX-AA-154-SCFI-2011, *Norma Mexicana. Determinación de nitrógeno de nitritos, en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas. Método de prueba.*

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2013). NMX-AA-007-2013, *Norma Mexicana. Análisis de agua. Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.*

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2015). NMX-AA-034-2015, *Norma Mexicana. Análisis de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.*

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2016a). NMX-AA-008-SCFI-2016, *Norma Mexicana. Análisis de agua. Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.*

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2016b). NMX-AA-051-SCFI-2016, *Norma Mexicana. Análisis de agua. Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.*

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2018). NMX-AA-093-SCFI-2018, *Norma Mexicana. Análisis de agua. Medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.*

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). NOM-083-SEMARNAT-2003, *Norma Oficial Mexicana. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obra complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.*

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2009). *El Medio Ambiente en México en resumen.* Consultado el 02 de septiembre de 2020 http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen_2009/07_residuos/cap7_1.html

Shenck GO. (1981) Ultraviolet Sterilization En: *W. Lorch. Handbook of water purification.* Chichester: Ellis Horwood Ltd. 530-595

Silva, T.F.C.V., Silva, M.E.F., Cunha-Queda, A.C., Fonseca, A., Saraiva, I., Boaventura, R.A.R., Vilar, V.J.P. (2013). Sanitary landfill leachate treatment using combined solar photo-Fenton and biological oxidation processes at pre-industrial scale. *Chemical Engineering Journal* 228, 850-866.

Singh, S.K., Tang, W.Z. (2013). Statistical analysis of optimum Fenton oxidation conditions for landfill leachate treatment. *Waste Management* 33, 81-88.

Solís-Correa HE. (2011). *Degradación de Índigo mediante procesos avanzados de oxidación.* Tesis para obtener el grado de Ciencias e Ingeniería. UAM-A.

Stasinakis A.S. (2008). Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment—a mini review. *Global NEST Journal.* 10 (3): 376-385.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. A. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos. España.* McGraw Hill.

Ullca, J. (2006). Los Rellenos Sanitarios. La Granja. *Revista de Ciencias de la Vida*. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador. (4) pp. 2-17. Consultado el 14 de diciembre de 2020: <https://www.redalyc.org/pdf/4760/476047388001.pdf>

USEPA (1996). *Ultraviolet Light Disinfection technology in drinking water application – an overview*. EPA 811-R-96-002 Washington, DC: Y.S. Environmental Protection Agency, Office of Ground Water and Drinking Water

Vilar, V.J.P., Capelo, S.M.S., Silva, T.F.C.V., y Boaventura, R.A.R. (2011). Solar photo-Fenton as a pre-oxidation step for biological treatment of landfill leachate in a pilot plant with CPCs. *Catalysis Today*, 161, 228-234.

Von Gunten U. (2003). Ozonation and drinking water: Part 1. Oxidation kinetic and product formation. *Water Research*. 37: 1443–67.

Wolfe TL. (1990) Ultraviolet disinfection of potable water, current technical and research needs. *Envir. Sci. Technol.* Vol. 24 (6): pp. 768-773

Wright H.B, y Cairns WL. (2005). Ultraviolet light. *Trojan Technologies Inc.* 3020 Gore Road, London, Ontario Canadá N5V-4T7. Consultado el 5 de febrero de 2021: <http://www.yumpu.com/en/document/read/11679278/ultraviolet-light-h-b-wright-and-w-l-cairns-trojan-bvsde>

Zamora-Villafranco Erika, Barceló-Quintal Icela D., Gómez-Salazar Sergio, Barceló-Quintal Manuel, Solís-Correa Hugo E., Soriano-Rodríguez Jesús Manuel (2014). Adsorption kinetics of matter contained in a leachate eggshell and activated carbon. *Journal of Environmental Protection (JEP)*.5:608-619.

Zamora-Villafranco E. (2014). *Desarrollo de un sistema de tratamiento por oxidación avanzada Fenton (Fe²⁺/H₂O₂)-adsorción con cáscara de huevo/quitosano y carbón activado para el tratamiento de lixiviados provenientes de un relleno sanitario*. Tesis Doctoral Posgrado en Ciencias e Ingeniería, Línea Ambiental, UAM-Azcapotzalco

Zamora-Villafranco E., Barceló-Quintal I.D, Vega-Paz A., Solís-Correa H.E. Méndez-Novelo R.I., Giacomán-Vallejo G. (2016). Leachate Treatment by Fenton Oxidation and Adsorption on Eggshell and Activated Carbon. *British Journal of Applied Science & Technology*. 17(2):

Apéndices

Apéndice 1

Medición de parámetros *In situ* de los lixiviados

1.1 Temperatura

| No. Sitio | Temperatura [°C] | | | | Promedio | Desv Std | % error |
|--------------|------------------|-------|-------|-------|--------------|----------|---------|
| | i | ii | iii | iv | | | |
| Lag1 | 13.70 | 13.60 | 13.80 | 13.60 | 13.68 | 0.171 | 1.25 |
| Lag2 | 12.40 | 12.60 | 12.50 | 12.40 | 12.48 | 0.754 | 6.05 |
| Lag3 | 15.70 | 15.70 | 15.60 | 15.60 | 15.65 | 0.835 | 5.33 |
| Lag4 | 14.50 | 14.50 | 14.60 | 14.50 | 14.53 | 0.271 | 1.86 |
| PMLag | | | | | 14.08 | | |

1.2 pH

| No. Sitio | pH | | | | Promedio | Desv Std | % error |
|--------------|------|------|------|------|-------------|----------|---------|
| | i | ii | iii | iv | | | |
| Lag1 | 8.47 | 8.51 | 8.54 | 8.55 | 8.52 | 0.036 | 0.42 |
| Lag2 | 8.56 | 8.57 | 8.59 | 8.55 | 8.57 | 0.017 | 0.20 |
| Lag3 | 8.51 | 8.53 | 8.54 | 8.55 | 8.53 | 0.017 | 0.20 |
| Lag4 | 8.59 | 8.60 | 8.61 | 8.64 | 8.61 | 0.022 | 0.25 |
| PMLag | | | | | 8.56 | | |

1.3 Conductividad

| No. Sitio | Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$] | | | | Promedio | Desv Std | % error |
|--------------|---|-----------|-----------|-----------|------------------|----------|---------|
| | i | ii | iii | iv | | | |
| Lag1 | 34,600.00 | 33,700.00 | 34,900.00 | 34,800.00 | 34,500.00 | 547.723 | 1.59 |
| Lag2 | 34,113.00 | 33,123.00 | 33,332.00 | 34,109.00 | 33,669.25 | 517.178 | 1.54 |
| Lag3 | 41,021.00 | 41,082.00 | 40,828.00 | 40,913.00 | 40,961.00 | 112.892 | 0.28 |
| Lag4 | 39,456.00 | 39,502.00 | 39,498.00 | 40,013.00 | 39,617.25 | 264.652 | 0.67 |
| PMLag | | | | | 37,186.88 | | |

1.4 ORP

| No. Sitio | ORP [mV] | | | | Promedio | Desv Std | % error |
|--------------|----------|---------|---------|---------|----------------|-------------|-------------|
| | i | ii | iii | iv | | | |
| Lag1 | -193.97 | -184.43 | -194.81 | -201.79 | -193.75 | 7.137 | 3.68 |
| Lag2 | -202.70 | -187.50 | -193.13 | -200.89 | -196.06 | 7.055 | 3.60 |
| Lag3 | -186.72 | -200.89 | -179.28 | -192.31 | -189.80 | 9.118 | 4.80 |
| Lag4 | -186.72 | -193.97 | -208.33 | -198.24 | -196.81 | 9.031 | 4.59 |
| PMLag | | | | | -194.11 | 3.15 | 1.62 |

1.5 OD

| No. Sitio | OD [mg/L] | | | | Promedio | Desv Std | % error |
|--------------|-----------|------|------|------|-------------|-------------|-------------|
| | i | ii | iii | iv | | | |
| Lag1 | 0.23 | 0.24 | 0.23 | 0.22 | 0.23 | 0.009 | 3.72 |
| Lag2 | 0.22 | 0.24 | 0.23 | 0.22 | 0.23 | 0.008 | 3.63 |
| Lag3 | 0.24 | 0.22 | 0.25 | 0.23 | 0.24 | 0.011 | 4.79 |
| Lag4 | 0.24 | 0.23 | 0.22 | 0.23 | 0.23 | 0.010 | 4.55 |
| PMLag | | | | | 0.23 | 0.00 | 1.66 |

Apéndice 2

Medición de parámetros *Ex situ* de los lixiviados

2.1 ST

| No. Sitio | M1: Cápsula | M3: Cápsula + Residuo | M3-M1 | Volumen filtrado | ST |
|---------------|-------------|-----------------------|--------|------------------|------------------|
| | [g] | | | [mL] | [mg/L] |
| Lag1.1 | 0.5012 | 2.4528 | 1.9516 | 150 | 13,010.67 |
| Lag1.2 | 0.5153 | 2.5182 | 2.0029 | 150 | 13,352.67 |
| Lag1.3 | 0.5301 | 2.5326 | 2.0025 | 150 | 13,350.00 |
| PROMEDIO LAG1 | | | | | 13,237.78 |
| Lag2.1 | 0.5150 | 2.4695 | 1.9545 | 150 | 13,030.00 |
| Lag2.2 | 0.5218 | 2.4554 | 1.9336 | 150 | 12,890.67 |
| Lag2.3 | 0.5260 | 2.4522 | 1.9262 | 150 | 12,841.33 |
| PROMEDIO LAG2 | | | | | 12,920.67 |
| Lag3.1 | 0.5152 | 2.9095 | 2.3943 | 150 | 15,962.00 |
| Lag3.2 | 0.5133 | 2.8714 | 2.3581 | 150 | 15,720.67 |
| Lag3.3 | 0.5223 | 2.8422 | 2.3199 | 150 | 15,466.00 |
| PROMEDIO LAG3 | | | | | 15,716.22 |
| Lag4.1 | 0.5186 | 2.7956 | 2.2770 | 150 | 15,180.00 |
| Lag4.2 | 0.5151 | 2.7932 | 2.2781 | 150 | 15,187.33 |
| Lag4.3 | 0.5015 | 2.7911 | 2.2896 | 150 | 15,264.00 |
| PROMEDIO LAG4 | | | | | 15,210.44 |
| PMLag | | | | | 14,271.28 |

2.2 SST

| No. Sitio | Filtro | Filtro + lodo | Lodo | Volumen filtrado | SST |
|---------------|--------|---------------|--------|------------------|-----------------|
| | [g] | | | [mL] | [mg/L] |
| Lag1.1 | 0.1287 | 0.1383 | 0.0096 | 8 | 1,200.00 |
| Lag1.2 | 0.1290 | 0.1373 | 0.0083 | 5 | 1,660.00 |
| Lag1.3 | 0.1284 | 0.1360 | 0.0076 | 5 | 1,520.00 |
| PROMEDIO LAG1 | | | | | 1,460.00 |
| Lag2.1 | 0.1283 | 0.1356 | 0.0073 | 5 | 1,460.00 |
| Lag2.2 | 0.1285 | 0.1354 | 0.0069 | 5 | 1,380.00 |
| Lag2.3 | 0.1296 | 0.1355 | 0.0059 | 5 | 1,180.00 |
| PROMEDIO LAG2 | | | | | 1,340.00 |
| Lag3.1 | 0.1288 | 0.1364 | 0.0076 | 5 | 1,520.00 |
| Lag3.2 | 0.1288 | 0.1365 | 0.0077 | 5 | 1,540.00 |
| Lag3.3 | 0.1287 | 0.1363 | 0.0076 | 5 | 1,520.00 |
| PROMEDIO LAG3 | | | | | 1,526.67 |
| Lag4.1 | 0.1284 | 0.1355 | 0.0071 | 5 | 1,420.00 |
| Lag4.2 | 0.1284 | 0.1358 | 0.0074 | 5 | 1,480.00 |
| Lag4.3 | 0.1283 | 0.1349 | 0.0066 | 5 | 1,320.00 |
| PROMEDIO LAG4 | | | | | 1,406.67 |
| PMLag | | | | | 1,433.33 |

2.3 SDT

| No. Sitio | ST | SST | SDT |
|---------------|-----------|----------|------------------|
| Lag1.1 | 13,010.67 | 1,200.00 | 11,810.67 |
| Lag1.2 | 13,352.67 | 1,660.00 | 11,692.67 |
| Lag1.3 | 13,350.00 | 1,520.00 | 11,830.00 |
| PROMEDIO LAG1 | | | 11,777.78 |
| Lag2.1 | 13,030.00 | 1,460.00 | 11,570.00 |
| Lag2.2 | 12,890.67 | 1,380.00 | 11,510.67 |
| Lag2.3 | 12,841.33 | 1,180.00 | 11,661.33 |
| PROMEDIO LAG2 | | | 11,580.67 |
| Lag3.1 | 15,962.00 | 1,520.00 | 14,442.00 |
| Lag3.2 | 15,720.67 | 1,540.00 | 14,180.67 |
| Lag3.3 | 15,466.00 | 1,520.00 | 13,946.00 |
| PROMEDIO LAG3 | | | 14,189.56 |
| Lag4.1 | 15,180.00 | 1,420.00 | 13,760.00 |
| Lag4.2 | 15,187.33 | 1,480.00 | 13,707.33 |
| Lag4.3 | 15,264.00 | 1,320.00 | 13,944.00 |
| PROMEDIO LAG4 | | | 13,803.78 |
| PM Lag | | | 12,837.94 |

2.4 DQO de LC

| Medidas de DQO | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|--------------|-------------|---------------|--------------|
| 2 ml de la muestra cruda 1:10 | | | | | | | |
| Sitios | i | ii | iii | Promedio | DesSTD. | Conc. Final | % de error |
| LC 1.1 | 1,508 | 1,502 | 1,509 | 1,506 | 3.79 | 15.063 | 0.25 |
| LC 1.2 | 1,504 | 1,510 | 1,502 | 1,505 | 4.16 | 15.053 | 0.28 |
| LC 1.3 | 1,510 | 1,507 | 1,510 | 1,509 | 1.73 | 15.090 | 0.11 |
| Promedio LC 1 | | | | 1,507 | 1.90 | 15,069 | 0.13 |
| LC 2.1 | 1,491 | 1,498 | 1,496 | 1,495 | 3.61 | 14.950 | 0.24 |
| LC 2.2 | 1,488 | 1,484 | 1,490 | 1,487 | 3.06 | 14.873 | 0.21 |
| LC 2.3 | 1,490 | 1,495 | 1,490 | 1,492 | 2.89 | 14.917 | 0.19 |
| Promedio LC 2 | | | | 1,491 | 3.84 | 14,913 | 0.26 |
| LC 3.1 | 1,494 | 1,499 | 1,495 | 1,496 | 2.65 | 14.960 | 0.18 |
| LC 3.2 | 1,499 | 1,495 | 1,496 | 1,497 | 2.08 | 14.967 | 0.14 |
| LC 3.3 | 1,497 | 1,500 | 1,495 | 1,497 | 2.52 | 14.973 | 0.17 |
| Promedio LC 3 | | | | 1,497 | 0.67 | 14,967 | 0.04 |
| LC 4.1 | 1,490 | 1,484 | 1,486 | 1,487 | 3.06 | 14.867 | 0.21 |
| LC 4.2 | 1,484 | 1,490 | 1,489 | 1,488 | 3.21 | 14.877 | 0.22 |
| LC 4.3 | 1,489 | 1,495 | 1,493 | 1,492 | 3.06 | 14.923 | 0.20 |
| Promedio LC 4 | | | | 1,489 | 3.02 | 14,889 | 0.20 |
| Promedio LC en la Laguna | | | | | 2.36 | 14,959 | 0.016 |

2.3 DQO de LA

| Medidas de DQO | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|------------|-------------|---------------|--------------|
| 2 ml de la muestra acidificada 1:20 | | | | | | | |
| Sitios | i | ii | iii | Promedio | Des.STD. | Conc. Final | % de error |
| LA 1.1 | 587 | 587 | 586 | 587 | 0.58 | 11,733 | 0.10 |
| LA 1.2 | 592 | 594 | 593 | 593 | 1.00 | 11,860 | 0.17 |
| LA 1.3 | 589 | 588 | 588 | 588 | 0.58 | 11,767 | 0.10 |
| Promedio LA 1 | | | | 589 | 3.28 | 11,787 | 0.56 |
| LA 2.1 | 582 | 581 | 581 | 581 | 0.58 | 11,627 | 0.10 |
| LA 2.2 | 588 | 588 | 588 | 588 | 0.00 | 11,760 | 0.00 |
| LA 2.3 | 584 | 590 | 590 | 588 | 3.46 | 11,760 | 0.59 |
| Promedio LA 2 | | | | 586 | 3.85 | 11,716 | 0.66 |
| LA 3.1 | 594 | 593 | 594 | 594 | 0.58 | 11,873 | 0.10 |
| LA 3.2 | 595 | 599 | 599 | 598 | 2.31 | 11,953 | 0.39 |
| LA 3.3 | 592 | 590 | 591 | 591 | 1.00 | 11,820 | 0.17 |
| Promedio LA 3 | | | | 594 | 3.36 | 11,882 | 0.56 |
| LA 4.1 | 589 | 591 | 590 | 590 | 1.00 | 11,800 | 0.17 |
| LA 4.2 | 587 | 587 | 588 | 587 | 0.58 | 11,747 | 0.10 |
| LA 4.3 | 588 | 586 | 588 | 587 | 1.15 | 11,747 | 0.20 |
| Promedio LA 4 | | | | 588 | 1.54 | 11,764 | 0.26 |
| Promedio LA en la Laguna | | | | | 3.01 | 11,787 | 0.026 |

2.4 DQO de LF

| Medidas de DQO | | | | | | | |
|---------------------------------|----|----|-----|-----------|-------------|-------------|--------------|
| 2 ml de la muestra fenton 1:10 | | | | | | | |
| Sitios | i | ii | iii | Promedio | Des.STD. | Conc. Final | % de error |
| LF 1.1 | 54 | 52 | 52 | 53 | 1.15 | 527 | 2.19 |
| LF 1.2 | 47 | 46 | 44 | 46 | 1.53 | 457 | 3.34 |
| LF 1.3 | 50 | 47 | 46 | 48 | 2.08 | 477 | 4.37 |
| Promedio LF 1 | | | | 49 | 3.61 | 487 | 7.41 |
| LF 2.1 | 63 | 62 | 62 | 62 | 0.58 | 623 | 0.93 |
| LF 2.2 | 70 | 69 | 69 | 69 | 0.58 | 693 | 0.83 |
| LF 2.3 | 67 | 68 | 67 | 67 | 0.58 | 673 | 0.86 |
| Promedio LF 2 | | | | 66 | 3.61 | 663 | 5.44 |
| LF 3.1 | 45 | 44 | 42 | 44 | 1.53 | 437 | 3.50 |
| LF 3.2 | 42 | 41 | 39 | 41 | 1.53 | 407 | 3.76 |
| LF 3.3 | 50 | 47 | 46 | 48 | 2.08 | 477 | 4.37 |
| Promedio LF 3 | | | | 44 | 3.51 | 440 | 7.98 |
| LF 4.1 | 49 | 47 | 47 | 48 | 1.15 | 477 | 2.42 |
| LF 4.2 | 42 | 41 | 40 | 41 | 1.00 | 410 | 2.44 |
| LF 4.3 | 50 | 47 | 46 | 48 | 2.08 | 477 | 4.37 |
| Promedio LF 4 | | | | 45 | 3.85 | 454 | 8.47 |
| Promedio LF en la Laguna | | | | | 3.64 | 511 | 0.732 |

2.5 DQO de LO

| Lixiviado promedio del sitio 1 | | | | | | 20mL de muestra | K=0.9884 | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|------------|---------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 485.66 | 487.82 | 486.52 | 486.67 | 1.0000 | 0.0000 | 1.09 | 0.22 |
| 10 | 454.15 | 449.80 | 447.41 | 450.45 | 0.9256 | -0.0773 | 3.42 | 0.76 |
| 20 | 415.62 | 419.16 | 419.68 | 418.15 | 0.8592 | -0.1517 | 2.21 | 0.53 |
| 30 | 374.21 | 375.12 | 377.94 | 375.76 | 0.7721 | -0.2586 | 1.94 | 0.52 |
| 40 | 337.17 | 331.97 | 333.25 | 334.13 | 0.6866 | -0.3760 | 2.71 | 0.81 |
| 50 | 293.04 | 288.13 | 295.89 | 292.35 | 0.6007 | -0.5096 | 3.93 | 1.34 |
| 60 | 262.85 | 262.39 | 260.48 | 261.91 | 0.5382 | -0.6196 | 1.26 | 0.48 |
| 70 | 238.23 | 235.07 | 235.70 | 236.33 | 0.4856 | -0.7224 | 1.67 | 0.71 |
| 80 | 201.42 | 204.78 | 201.37 | 202.52 | 0.4161 | -0.8767 | 1.95 | 0.97 |
| 90 | 176.48 | 171.73 | 174.21 | 174.14 | 0.3578 | -1.0277 | 2.38 | 1.36 |
| 100 | 155.12 | 154.55 | 154.79 | 154.82 | 0.3181 | -1.1453 | 0.29 | 0.18 |

| Lixiviado promedio del sitio 2 | | | | | | 20mL de muestra | K=0.9893 | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|------------|---------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 662.71 | 664.21 | 663.07 | 663.33 | 1.0000 | 0.0000 | 0.78 | 0.12 |
| 10 | 619.63 | 616.97 | 618.05 | 618.22 | 0.9320 | -0.0704 | 1.34 | 0.22 |
| 20 | 553.58 | 551.02 | 552.35 | 552.32 | 0.8326 | -0.1832 | 1.28 | 0.23 |
| 30 | 511.28 | 512.27 | 509.88 | 511.14 | 0.7706 | -0.2606 | 1.20 | 0.23 |
| 40 | 456.33 | 460.72 | 456.42 | 457.82 | 0.6902 | -0.3708 | 2.51 | 0.55 |
| 50 | 400.26 | 404.41 | 404.62 | 403.1 | 0.6077 | -0.4981 | 2.46 | 0.61 |
| 60 | 362.64 | 361.27 | 357.39 | 360.43 | 0.5434 | -0.6100 | 2.72 | 0.76 |
| 70 | 326.72 | 327.18 | 325.21 | 326.37 | 0.4920 | -0.7092 | 1.03 | 0.32 |
| 80 | 292.94 | 295.15 | 294.27 | 294.12 | 0.4434 | -0.8133 | 1.11 | 0.38 |
| 90 | 256.19 | 255.76 | 257.38 | 256.44 | 0.3866 | -0.9504 | 0.84 | 0.33 |
| 100 | 226.98 | 231.33 | 230.35 | 229.55 | 0.3461 | -1.0612 | 2.28 | 0.99 |

| Lixiviado promedio del sitio 3 | | | | | | 20mL de muestra | K=0.9887 | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|------------|---------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 440.47 | 441.14 | 438.39 | 440.00 | 1.0000 | 0.0000 | 1.43 | 0.33 |
| 10 | 412.87 | 410.96 | 411.45 | 411.76 | 0.9358 | -0.0663 | 0.99 | 0.24 |
| 20 | 384.26 | 386.63 | 385.63 | 385.51 | 0.8762 | -0.1322 | 1.19 | 0.31 |
| 30 | 343.74 | 346.24 | 342.27 | 344.08 | 0.7820 | -0.2459 | 2.01 | 0.58 |
| 40 | 303.23 | 306.48 | 303.92 | 304.54 | 0.6921 | -0.3680 | 1.71 | 0.56 |
| 50 | 276.09 | 271.51 | 272.21 | 273.27 | 0.6211 | -0.4763 | 2.47 | 0.90 |
| 60 | 244.18 | 245.37 | 244.16 | 244.57 | 0.5558 | -0.5873 | 0.69 | 0.28 |
| 70 | 212.41 | 210.52 | 210.93 | 211.29 | 0.4802 | -0.7335 | 0.99 | 0.47 |
| 80 | 188.62 | 189.58 | 189.21 | 189.14 | 0.4299 | -0.8443 | 0.48 | 0.26 |
| 90 | 169.49 | 166.11 | 163.39 | 166.33 | 0.3780 | -0.9728 | 3.06 | 1.84 |
| 100 | 142.85 | 143.16 | 142.61 | 142.87 | 0.3247 | -1.1248 | 0.28 | 0.19 |

| Lixiviado promedio del sitio 4 | | | | | | | 20mL de muestra | K=0.9888 |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-------------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 452.96 | 453.73 | 456.64 | 454.44 | 1.0000 | 0.0000 | 1.94 | 0.43 |
| 10 | 441.37 | 442.12 | 438.19 | 440.56 | 0.9694 | -0.0310 | 2.09 | 0.47 |
| 20 | 398.79 | 401.74 | 399.93 | 400.15 | 0.8805 | -0.1272 | 1.49 | 0.37 |
| 30 | 356.38 | 355.41 | 353.45 | 355.08 | 0.7813 | -0.2467 | 1.49 | 0.42 |
| 40 | 320.59 | 321.91 | 322.67 | 321.72 | 0.7079 | -0.3454 | 1.05 | 0.33 |
| 50 | 284.79 | 286.45 | 285.42 | 285.55 | 0.6283 | -0.4647 | 0.84 | 0.29 |
| 60 | 254.29 | 253.15 | 251.49 | 252.98 | 0.5567 | -0.5858 | 1.41 | 0.56 |
| 70 | 219.9 | 222.12 | 222.19 | 221.4 | 0.4872 | -0.7191 | 1.30 | 0.59 |
| 80 | 203.48 | 202.05 | 201.32 | 202.28 | 0.4451 | -0.8094 | 1.10 | 0.54 |
| 90 | 176.21 | 180.38 | 178.73 | 178.44 | 0.3927 | -0.9348 | 2.10 | 1.18 |
| 100 | 149.13 | 150.38 | 148.97 | 149.49 | 0.3290 | -1.1118 | 0.77 | 0.52 |

2.6 DQO de LUV

| Lixiviado promedio del sitio 1 | | | | | | | 20mL de muestra | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-------------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 154.64 | 153.88 | 155.93 | 154.82 | 1.0000 | 0.0000 | 1.04 | 0.67 |
| 10 | 139.84 | 142.15 | 141.66 | 141.22 | 0.9122 | -0.0919 | 1.22 | 0.86 |
| 20 | 123.83 | 120.62 | 122.49 | 122.31 | 0.7900 | -0.2357 | 1.61 | 1.32 |
| 30 | 108.74 | 106.89 | 105.92 | 107.18 | 0.6923 | -0.3678 | 1.43 | 1.34 |
| 40 | 89.73 | 88.73 | 86.92 | 88.46 | 0.5714 | -0.5597 | 1.42 | 1.61 |
| 50 | 69.54 | 71.91 | 70.89 | 70.78 | 0.4572 | -0.7827 | 1.19 | 1.68 |
| 60 | 59.83 | 61.39 | 59.23 | 60.15 | 0.3885 | -0.9454 | 1.11 | 1.85 |
| 70 | 51.59 | 51.81 | 49.92 | 51.11 | 0.3301 | -1.1083 | 1.03 | 2.02 |
| 80 | 45.73 | 44.42 | 46.15 | 45.12 | 0.2914 | -1.2329 | 0.90 | 2.00 |
| 90 | 39.37 | 36.15 | 38.88 | 38.13 | 0.2463 | -1.4013 | 1.74 | 4.55 |
| 100 | 31.45 | 32.75 | 31.89 | 32.03 | 0.2069 | -1.5756 | 0.66 | 2.06 |

| Lixiviado promedio del sitio 2 | | | | | | | 20mL de muestra | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-------------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 228.71 | 230.81 | 229.13 | 229.55 | 1.0000 | 0.0000 | 1.11 | 0.48 |
| 10 | 209.6 | 205.97 | 207.36 | 207.64 | 0.9046 | -0.1003 | 1.83 | 0.88 |
| 20 | 183.08 | 182.39 | 181.21 | 182.23 | 0.7939 | -0.2309 | 0.95 | 0.52 |
| 30 | 161.82 | 164.38 | 160.47 | 162.22 | 0.7067 | -0.3472 | 1.99 | 1.22 |
| 40 | 141.44 | 143.63 | 141.28 | 142.12 | 0.6191 | -0.4794 | 1.31 | 0.92 |
| 50 | 124.76 | 123.33 | 124.24 | 124.11 | 0.5407 | -0.6150 | 0.72 | 0.58 |
| 60 | 108.24 | 108.53 | 107.88 | 108.22 | 0.4714 | -0.7520 | 0.33 | 0.30 |
| 70 | 91.21 | 93.02 | 94.32 | 92.85 | 0.4045 | -0.9051 | 1.56 | 1.68 |
| 80 | 82.07 | 79.31 | 79.42 | 80.27 | 0.3497 | -1.0507 | 1.56 | 1.95 |
| 90 | 69.53 | 69.46 | 70.14 | 69.71 | 0.3037 | -1.1918 | 0.37 | 0.54 |
| 100 | 56.88 | 58.24 | 59.29 | 58.14 | 0.2533 | -1.3733 | 1.21 | 2.08 |

| Lixiviado promedio del sitio 3 | | | | | | 20mL de muestra | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 143.88 | 142.89 | 141.83 | 142.87 | 1.0000 | 0.0000 | 1.03 | 0.72 |
| 10 | 132.13 | 132.86 | 133.25 | 132.69 | 0.9287 | -0.0739 | 0.79 | 0.60 |
| 20 | 121.37 | 118.53 | 119.42 | 119.77 | 0.8383 | -0.1764 | 1.45 | 1.21 |
| 30 | 102.14 | 101.31 | 100.01 | 101.15 | 0.7080 | -0.3453 | 1.07 | 1.06 |
| 40 | 84.89 | 86.09 | 87.11 | 86.03 | 0.6022 | -0.5072 | 1.11 | 1.29 |
| 50 | 73.01 | 71.29 | 72.05 | 72.12 | 0.5048 | -0.6836 | 0.86 | 1.20 |
| 60 | 59.98 | 62.04 | 61.39 | 61.14 | 0.4279 | -0.8488 | 1.05 | 1.72 |
| 70 | 51.93 | 51.32 | 50.74 | 51.33 | 0.3593 | -1.0237 | 0.60 | 1.16 |
| 80 | 43.86 | 41.58 | 42.64 | 42.69 | 0.2988 | -1.2080 | 1.14 | 2.67 |
| 90 | 36.27 | 35.73 | 38.51 | 35.72 | 0.2500 | -1.3862 | 1.47 | 4.13 |
| 100 | 30.31 | 28.16 | 29.17 | 29.21 | 0.2045 | -1.5874 | 1.08 | 3.68 |

| Lixiviado promedio del sitio 4 | | | | | | 20mL de muestra | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 148.49 | 150.52 | 149.46 | 149.49 | 1.0000 | 0.0000 | 1.02 | 0.68 |
| 10 | 138.94 | 136.38 | 137.28 | 137.29 | 0.9184 | -0.0851 | 1.30 | 0.95 |
| 20 | 122.16 | 121.35 | 122.89 | 122.13 | 0.8170 | -0.2021 | 0.77 | 0.63 |
| 30 | 108.42 | 107.32 | 108.42 | 108.05 | 0.7228 | -0.3246 | 0.64 | 0.59 |
| 40 | 92.92 | 92.36 | 92.01 | 92.43 | 0.6183 | -0.4808 | 0.46 | 0.50 |
| 50 | 80.05 | 80.53 | 82.74 | 81.11 | 0.5426 | -0.6114 | 1.43 | 1.77 |
| 60 | 71.35 | 70.77 | 68.54 | 70.22 | 0.4697 | -0.7556 | 1.48 | 2.11 |
| 70 | 60.14 | 61.03 | 58.15 | 59.77 | 0.3998 | -0.9167 | 1.47 | 2.47 |
| 80 | 50.41 | 52.45 | 51.5 | 51.45 | 0.3442 | -1.0666 | 1.02 | 1.98 |
| 90 | 45.09 | 43.63 | 43.82 | 44.18 | 0.2955 | -1.2190 | 0.79 | 1.80 |
| 100 | 35.66 | 37.17 | 36.13 | 36.32 | 0.2430 | -1.4149 | 0.77 | 2.13 |

2.7 DQO de LO+LUV

| Lixiviado promedio del sitio 1 | | | | | | 20mL de muestra | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 485.66 | 487.82 | 486.52 | 486.67 | 1.0000 | 0.0000 | 1.09 | 0.22 |
| 10 | 442.55 | 441.28 | 438.64 | 440.82 | 0.9058 | -0.0989 | 1.99 | 0.45 |
| 20 | 361.93 | 362.63 | 363.11 | 362.56 | 0.7450 | -0.2944 | 0.59 | 0.16 |
| 30 | 266.82 | 268.18 | 266.92 | 267.31 | 0.5493 | -0.5992 | 0.76 | 0.28 |
| 40 | 201.94 | 203.66 | 202.87 | 202.82 | 0.4168 | -0.8753 | 0.86 | 0.42 |
| 50 | 144.17 | 143.42 | 143.15 | 143.58 | 0.2950 | -1.2207 | 0.53 | 0.37 |
| 60 | 112.82 | 112.29 | 111.25 | 112.12 | 0.2304 | -1.4680 | 0.80 | 0.71 |
| 70 | 80.59 | 83.64 | 82.62 | 82.28 | 0.1691 | -1.7775 | 1.55 | 1.89 |
| 80 | 61.25 | 60.22 | 61.87 | 61.11 | 0.1256 | -2.0749 | 0.83 | 1.36 |
| 90 | 45.07 | 43.81 | 45.93 | 44.94 | 0.0923 | -2.3823 | 1.07 | 2.37 |
| 100 | 28.92 | 29.53 | 29.58 | 29.34 | 0.0603 | -2.8086 | 0.37 | 1.25 |

| Lixiviado promedio del sitio 2 | | | | | | 20mL de muestra | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 662.71 | 664.21 | 663.07 | 663.33 | 1.0000 | 0.0000 | 0.78 | 0.12 |
| 10 | 561.39 | 562.05 | 563.28 | 562.24 | 0.8476 | -0.1653 | 0.96 | 0.17 |
| 20 | 451.61 | 453.8 | 452.75 | 452.72 | 0.6825 | -0.3820 | 1.10 | 0.24 |
| 30 | 336.92 | 337.25 | 337.61 | 337.26 | 0.5084 | -0.6764 | 0.35 | 0.10 |
| 40 | 247.83 | 247.95 | 247.06 | 247.61 | 0.3733 | -0.9854 | 0.48 | 0.20 |
| 50 | 208.87 | 208.17 | 208.13 | 208.39 | 0.3142 | -1.1579 | 0.42 | 0.20 |
| 60 | 155.08 | 157.25 | 156.09 | 156.14 | 0.2354 | -1.4465 | 1.09 | 0.70 |
| 70 | 119.15 | 118.38 | 117.42 | 118.32 | 0.1784 | -1.7239 | 0.87 | 0.73 |
| 80 | 92.73 | 91.89 | 90.59 | 91.74 | 0.1383 | -1.9783 | 1.08 | 1.18 |
| 90 | 62.77 | 64.52 | 63.69 | 63.66 | 0.0960 | -2.3437 | 0.88 | 1.38 |
| 100 | 41.41 | 39.89 | 41.23 | 40.84 | 0.0616 | -2.7876 | 0.83 | 2.03 |

| Lixiviado promedio del sitio 3 | | | | | | 20mL de muestra | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 440.47 | 441.14 | 438.39 | 440.00 | 1.0000 | 0.0000 | 1.43 | 0.33 |
| 10 | 330.03 | 327.82 | 329.37 | 329.07 | 0.7479 | -0.2905 | 1.13 | 0.34 |
| 20 | 256.52 | 258.83 | 257.95 | 257.77 | 0.5858 | -0.5347 | 1.17 | 0.45 |
| 30 | 179.29 | 177.53 | 178.87 | 178.56 | 0.4058 | -0.9019 | 0.92 | 0.51 |
| 40 | 128.17 | 127.03 | 127.39 | 127.53 | 0.2898 | -1.2384 | 0.58 | 0.46 |
| 50 | 87.35 | 89.19 | 88.78 | 88.44 | 0.2010 | -1.6045 | 0.97 | 1.09 |
| 60 | 67.73 | 65.79 | 66.61 | 66.71 | 0.1516 | -1.8864 | 0.97 | 1.46 |
| 70 | 49.42 | 47.88 | 48.87 | 48.72 | 0.1107 | -2.2007 | 0.78 | 1.60 |
| 80 | 39.12 | 38.31 | 38.52 | 38.65 | 0.0878 | -2.4322 | 0.42 | 1.09 |
| 90 | 29.14 | 29.89 | 31.12 | 30.05 | 0.0683 | -2.6839 | 1.00 | 3.33 |
| 100 | 25.95 | 26.12 | 26.35 | 26.14 | 0.0594 | -2.8233 | 0.20 | 0.77 |

| Lixiviado promedio del sitio 4 | | | | | | 20mL de muestra | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|
| Lixiviado a pH 8 | DQO | | | | | | Desv. Est. | % error |
| Tiempo (min) | i | ii | iii | Prom | Ci/Co | InCi/Co | | |
| 0 | 452.96 | 453.73 | 456.64 | 454.44 | 1.0000 | 0.0000 | 1.94 | 0.43 |
| 10 | 342.14 | 341.36 | 340.07 | 341.19 | 0.7508 | -0.2866 | 1.05 | 0.31 |
| 20 | 236.63 | 237.34 | 237.13 | 237.03 | 0.5216 | -0.6509 | 0.36 | 0.15 |
| 30 | 186.31 | 187.39 | 187.62 | 187.11 | 0.4117 | -0.8874 | 0.70 | 0.37 |
| 40 | 130.12 | 129.03 | 128.85 | 129.33 | 0.2846 | -1.2567 | 0.69 | 0.53 |
| 50 | 99.02 | 99.27 | 98.92 | 99.07 | 0.2180 | -1.5232 | 0.18 | 0.18 |
| 60 | 76.97 | 78.71 | 77.65 | 77.78 | 0.1712 | -1.7652 | 0.88 | 1.13 |
| 70 | 54.42 | 52.98 | 53.84 | 52.75 | 0.1161 | -2.1535 | 0.72 | 1.37 |
| 80 | 41.82 | 40.11 | 41.39 | 41.11 | 0.0905 | -2.4028 | 0.89 | 2.16 |
| 90 | 34.02 | 33.71 | 33.72 | 33.82 | 0.0744 | -2.5980 | 0.18 | 0.52 |
| 100 | 29.15 | 27.59 | 27.67 | 28.14 | 0.0619 | -2.7819 | 0.88 | 3.12 |

2.8 Porcentaje de remoción

| Sitio | LC | | LA | | LF | | LO | | LUV | | LO+LUV | |
|-----------------------|--------|---------------|--------|---------------|------|---------------|------|---------------|------|---------------|--------|---------------|
| | mg/L | % de remoción | mg/L | % de remoción | mg/L | % de remoción | mg/L | % de remoción | mg/L | % de remoción | mg/L | % de remoción |
| Lag1 | 15,069 | 0% | 11,787 | 21.8% | 487 | 96.8% | 155 | 99.0% | 32 | 99.8% | 29 | 99.8% |
| Lag2 | 14,913 | 0% | 11,716 | 21.4% | 663 | 95.6% | 230 | 98.5% | 58 | 99.6% | 41 | 99.7% |
| Lag3 | 14,967 | 0% | 11,882 | 20.6% | 440 | 97.1% | 143 | 99.0% | 29 | 99.8% | 26 | 99.8% |
| Lag4 | 14,889 | 0% | 11,764 | 21.0% | 454 | 96.9% | 149 | 99.0% | 36 | 99.8% | 28 | 99.8% |
| Promedio de la laguna | 14,959 | 0% | 11,787 | 21.2% | 511 | 96.6% | 169 | 98.9% | 39 | 99.7% | 31 | 99.8% |