

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | <u>Página</u> |
|---------------------------|---------------|
| LISTA DE TABLAS | xii |
| LISTA DE FIGURAS | xvi |
| RESUMEN | xix |
| ABSTRACT | xxi |
| | |
| CAPÍTULO 1 | |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| CAPÍTULO 2 | |
| OBJETIVOS | 6 |
| 2.1. General | 6 |
| 2.2. Específicos | 6 |
| | |
| CAPÍTULO 3 | |
| HIPÓTESIS | 8 |
| | |
| CAPÍTULO 4 | |
| ANTECEDENTES | 9 |

CAPÍTULO 5

| | |
|---|----|
| MARCO TEÓRICO | 14 |
| 5.1. El suelo | 14 |
| 5.1.1. Definición geológica de suelo | 14 |
| 5.1.2. Clasificación de los suelos | 15 |
| 5.2. Contaminación de suelos | 17 |
| 5.2.1. Sitios contaminados en México | 18 |
| 5.2.2. Contaminantes persistentes en México | 20 |
| 5.2.3. Los plaguicidas | 21 |
| 5.3. Surfactantes | 26 |
| 5.3.1. Definición de surfactante | 26 |
| 5.3.2. Clasificación de surfactantes | 27 |
| 5.3.2.1. Surfactante SDS (Dodecil Sulfato de Sodio) | 29 |
| 5.4. Restauración de suelos contaminados | 30 |
| 5.4.1. Técnicas de restauración | 30 |
| 5.4.2. Lavado de suelos contaminados | 43 |
| 5.4.2.1 Estimación de costos de lavado de suelos | 46 |
| 5.5. Proceso de mezclado para el método de lavado de suelos contaminados | 49 |
| 5.5.1. Vaso de agitación | 49 |
| 5.5.2. Deflectores | 51 |
| 5.5.3. Impulsores | 54 |
| 5.5.3.1. Impulsores de tipo Axial | 57 |

| | | |
|------------------------------------|-------|----|
| 5.5.3.2. Impulsores de tipo Radial | | 59 |
|------------------------------------|-------|----|

CAPÍTULO 6

| | | |
|---|-------|----|
| SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS | ..... | 64 |
| 6.1. Estados de suspensión de sólidos | ..... | 65 |
| 6.1.1. Suspensión total o completa | ..... | 65 |
| 6.1.2. Suspensión de tipo homogénea | ..... | 70 |
| 6.2. Franjas de partículas sólidas en el fondo o en esquinas | ..... | 70 |

CAPÍTULO 7

| | | |
|--|-------|----|
| METODOLOGÍA | ..... | 71 |
| 7.1. Suelo tratado | ..... | 71 |
| 7.1.1 Generación de suelo contaminado con plaguicida 2,4-D | ..... | 71 |
| 7.2. Caracterización del suelo | ..... | 72 |
| 7.3. Procedimiento general del proceso de mejoramiento de suelos contaminados mediante lavado con surfactantes y el uso de impulsores en un tanque de agitación | ..... | 76 |
| 7.4. Dosificaciones en el proceso de lavado con la ayuda mecánica de impulsores | ..... | 77 |

| | |
|--|----|
| 7.4.1. Dosificaciones utilizadas por corrida de lavado en la fase de determinación de tiempo óptimo | 78 |
| 7.4.2. Dosificaciones utilizadas por corrida de lavado en la fase de determinación de concentración óptima de suelo | 79 |
| 7.4.3. Dosificaciones empleadas por corrida de lavado en la determinación de velocidad óptima de lavado | 79 |
| 7.5. Análisis de las muestras | 80 |
| 7.6. Impulsor utilizado | 80 |
| 7.7. Equipo de agitación | 81 |

CAPÍTULO 8

| | |
|--------------------------------------|----|
| MATERIALES | 82 |
| 8.1. Materiales de laboratorio | 82 |
| 8.2. Equipo de laboratorio | 83 |
| 8.3. Sustancias empleadas | 84 |

CAPÍTULO 9

| | | |
|--|-------|----|
| RESULTADOS Y ANÁLISIS | ..... | 85 |
| 9.1. Caracterización del suelo | ..... | 85 |
| 9.2. Determinación de tiempo Óptimo | ..... | 87 |
| 9.3. Pruebas de lavado a velocidad constante | | |
| con variaciones en la relación suelo/agua | ..... | 89 |
| 9.4. Pruebas de lavado a concentración de | | |
| suelo constante con variaciones de velocidad | ..... | 95 |

CAPÍTULO 10

| | | |
|---|-------|-----|
| ESCALAMIENTO | ..... | 102 |
| 10.1 Semejanza Geométrica | ..... | 102 |
| 10.2 Número de Reynolds | ..... | 104 |
| 10.3 Número de Potencia | ..... | 104 |
| 10.4 Número de flujo del impulsor | ..... | 105 |
| 10.5 Consumo de potencia y energía asociada | | |
| al proceso como parámetros de escalamiento | ..... | 108 |
| 10.6 Velocidad mínima de agitación | ..... | 113 |

CAPÍTULO 11

| | |
|---|-----|
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 117 |
| 11.1. Conclusiones | 117 |
| 11.2. Recomendaciones | 123 |

APENDICE A

| | |
|---|-----|
| Normatividad Ecológica que regula a los plaguicidas | 124 |
| Leyes Federales de Protección al ambiente | 124 |
| Reglamentos Federales en materia ambiental | 132 |
| Normas Oficiales Mexicanas que Regulan a los Plaguicidas | 133 |

APENDICE B

| | |
|---|-----|
| Caracterización de Suelo | 147 |
| Determinación del Tiempo Óptimo | 148 |
| Determinación de Velocidad Óptima | 152 |
| Determinación de Concentración Óptima | 153 |
| Consumo de potencia por unidad de volumen en la determinación de tiempo y concentración óptima de lavado | 155 |
| Consumo de potencia por unidad de volumen en la determinación de la velocidad óptima de lavado | 156 |

| | |
|------------------------------|-----|
| REFERENCIAS | 157 |
| Referencias de Tablas | 166 |
| Referencias de Figuras | 167 |

ÍNDICE DE TABLAS

| <u>Tabla</u> | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| 5.1 Categorías de suelos en México de acuerdo a la Clasificación Internacional | 16 |
| 5.2 Clasificación de Plaguicidas en base a diferentes criterios | 22 |
| 5.9 Estimado de costos de ejecución del proceso de lavado de suelos | 47 |
| 5.10 Energía asociada, prueba para la determinación de concentración óptima. | 48 |
| 5.11 Energía asociada, prueba para la determinación de velocidad óptima. | 48 |
| 7.1 Mallas empleadas para la prueba granulométrica del suelo | 75 |
| 7.2 Impulsor Lightnin | 80 |
| 8.1 Materiales de Laboratorio | 82 |
| 8.2 Equipo de Laboratorio | 83 |
| 8.3 Sustancias empleadas | 84 |
| 10.1 Valores de N_Q para impulsores usados con más frecuencia en procesos de mezclado | 106 |

| | | | |
|-------|---|-------|-----|
| 10.2 | Proceso de lavado a velocidad constante (1400 rpm), 10% concentración de suelo | ..... | 109 |
| 10.3 | Proceso de lavado a velocidad constante (1400 rpm), 20% concentración de suelo | ..... | 109 |
| 10.4 | Proceso de lavado a velocidad constante (1400 rpm), 30% concentración de suelo | ..... | 110 |
| 10.5 | Proceso de lavado a velocidad constante (1400 rpm), 40% concentración de suelo | ..... | 110 |
| 10.6 | Proceso de lavado a concentración constante (40%), 1200 rpm. | .... | 111 |
| 10.7 | Proceso de lavado a concentración constante (40%), 1400 rpm | .... | 111 |
| 10.8 | Proceso de lavado a concentración constante (40%), 1550 rpm | .... | 112 |
| 10.9 | Proceso de lavado a concentración constante (40%), 1700 rpm | .... | 112 |
| 10.10 | Velocidades mínimas de agitación observadas con variaciones de concentración de suelos | ..... | 114 |
| 10.11 | Nomenclaturas necesarias para desarrollar la fórmula de correlación para predecir la velocidad mínima de agitación | .... | 115 |
| 10.12 | Velocidades mínimas de agitación, de acuerdo a la concentración de suelo, obtenidas mediante la ecuación de Armenante | ..... | 116 |

| | | |
|------|--|-----|
| A-1 | Datos importantes para el transporte del ácido 2,4-D | 139 |
| B-1 | Distribución Granulométrica | 147 |
| B-2 | Primera prueba para la Determinación de Tiempo Óptimo | 148 |
| B-3 | Segunda Prueba para la Determinación de Tiempo Óptimo | 148 |
| B-4 | Primera Prueba a 10% Concentración de Suelo, Velocidad Constante | 149 |
| B-5 | Segunda Prueba a 10% Concentración de Suelo, Velocidad Constante | 149 |
| B-6 | Primera Prueba a 20% Concentración de Suelo, Velocidad Constante | 149 |
| B-7 | Segunda Prueba a 20% Concentración de Suelo, Velocidad Constante | 150 |
| B-8 | Primera Prueba a 30% Concentración de Suelo, Velocidad Constante | 150 |
| B-9 | Segunda Prueba a 30% Concentración de Suelo, Velocidad Constante | 150 |
| B-10 | Primera Prueba a 40% Concentración de Suelo, Velocidad Constante | 151 |
| B-11 | Segunda Prueba a 40% Concentración de Suelo, Velocidad Constante | 151 |
| B-12 | Primera Prueba Velocidad: 1200 rpm, Concentración Constante: 40% de suelo | 152 |
| B-13 | Segunda Prueba Velocidad: 1200 rpm, Concentración Constante: 40% de suelo | 152 |

| | | |
|------|--|-----|
| B-14 | Primera Prueba Velocidad: 1400 rpm, Concentración | |
| | Constante: 40% de suelo | 152 |
| B-15 | Segunda Prueba Velocidad: 1400 rpm, Concentración | |
| | Constante: 40% de suelo | 153 |
| B-16 | Primera Prueba Velocidad: 1550 rpm, Concentración | |
| | Constante: 40% de suelo | 153 |
| B-17 | Segunda Prueba Velocidad: 1550 rpm, Concentración | |
| | Constante: 40% de suelo | 153 |
| B-18 | Primera Prueba Velocidad: 1700 rpm, Concentración | |
| | Constante: 40% de suelo | 154 |
| B-19 | Segunda Prueba Velocidad: 1700 rpm, Concentración | |
| | Constante: 40% de suelo | 154 |
| B-20 | Consumo de potencia por unidad de volumen en la determinación de tiempo y concentración de lavado | 155 |
| B-21 | Consumo de potencia por unidad de volumen en la determinación de la velocidad óptima de lavado | 156 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| <u>Figura</u> | <u>Página</u> |
|---|---------------|
| 5.1 Distribución de Sitios Contaminados en la República Mexicana | 19 |
| 5.2 Estructura química del ácido 2,4-D. | 25 |
| 5.3 Estructura química del Dodecil Sulfato de Sodio | 29 |
| 5.4 Proceso del método de Biorestauración <i>in situ</i> de agua y suelo | 34 |
| 5.5 Proceso de Biorestauración <i>ex situ</i> en agua y suelo | 35 |
| 5.6 Proceso de Fito-restauración | 39 |
| 5.7 Proceso de deshalogenación catalítica | 41 |
| 5.8 Proceso de restauración de agua contaminada por muros de tratamiento | 42 |
| 5.9 Proceso de Lavado de Suelos Contaminados | 45 |
| 5.10 Remolino formado por un impulsor de flujo axial | 52 |
| 5.11 Remolino formado por un impulsor de flujo radial | 52 |
| 5.12 Patrón de flujo creado por una turbina de flujo axial en un tanque de agitación con deflectores | 53 |
| 5.13 Patrón de flujo creado por un impulsor de flujo radial en un tanque de agitación con deflectores | 53 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.14 | Diseños de turbinas por: Lightnin Co. y Post Mixing Co. | 55 |
| 5.15 | Propela Marina | 57 |
| 5.16 | Impulsor de flujo Axial de paletas inclinadas | 57 |
| 5.17 | Impulsor de Flujo Axial de tres cuchillas con disminución en el ancho y ángulo de cuchillas desde el centro hacia la punta | 58 |
| 5.18 | Impulsor de Flujo Axial de doble espiral | 58 |
| 5.19 | Impulsor de Flujo Radial de Paletas Planas | 59 |
| 5.20 | Turbina de Barras | 59 |
| 5.21 | Impulsor de Tipo Ancla | 60 |
| 5.22 | Montaje típico y patrón de flujo para impulsores de entrada lateral ... | 61 |
| 5.23 | Patrones de flujo; correcto e incorrecto, obtenidos de acuerdo al ángulo de posición del impulsor | 62 |
| 6.1 | Velocidad de agitación suave | 66 |
| 6.2 | Velocidad de agitación moderada | 67 |
| 6.3 | Velocidad de agitación vigorosa | 68 |
| 6.4 | Velocidad de agitación violenta | 69 |
| 7.1 | Equipo de Agitación | 81 |
| 9.1 | Curva de distribución granulométrica | 86 |
| 9.2 | Determinación de tiempo óptimo para el proceso de lavado de suelos contaminados con 2,4-D | 88 |
| 9.3 | Potencias de agitación en la determinación de la concentración óptima de suelo | 90 |

| | | |
|------|---|-----|
| 9.4 | Energías asociadas al sistema de lavado de suelos para la determinación de concentración óptima de suelo | 92 |
| 9.5 | Determinación de concentración óptima de suelo a velocidad constante (1400 rpm). | 94 |
| 9.6 | Determinación de velocidad óptima de lavado | 96 |
| 9.7 | Energía asociada al sistema de lavado de suelos en la determinación de velocidad óptima de agitación | 98 |
| 9.8 | Porcentaje de remoción obtenido en la determinación de velocidad óptima de agitación | 99 |
| 10.1 | Ejemplo de semejanza geométrica | 103 |
| 10.2 | N_{Re} contra N_Q en relación con la razón del diámetro del impulsor y el diámetro del tanque de agitación D/T | 107 |