



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:  
DISEÑO DE UN TREN DE TRATAMIENTO PARA EL  
LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO “LAS IGUANAS” DE  
LA CIUDAD DE GUAYAQUIL**

**AUTORA:  
Quevedo Asanza, Ángela Jacqueline**

**TRABAJO DE GRADO  
PREVIO A LA TITULACION DE INGENIERA CIVIL**

**TUTOR:  
Ing. Neira Ruiz, Fabián**

**Guayaquil, Ecuador  
2013**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **ÁNGELA JACQUELINE, QUEVEDO ASANZA**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **INGENIERA CIVIL**.

### **TUTOR**

---

**Ing. Fabián, Neira Ruiz**

### **REVISORES**

---

**Ing. Mario, García Cruz**

---

**Mgs. Sonia, Baño Pazmiño**

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

**Ing. Mario, Dueñas Rossi**

**Guayaquil, a los 29 días del mes de Junio del año 2013**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Ángela Jacqueline Quevedo Asanza**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación: **DISEÑO DE UN TREN DE TRATAMIENTO PARA EL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO “LAS IGUANAS” DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL** previa a la obtención del Título de **INGENIERA CIVIL**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 29 días del mes de junio del año 2013**

**LA AUTORA**

---

**Ángela Jacqueline, Quevedo Asanza**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Ángela Jacqueline Quevedo Asanza**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **DISEÑO DE UN TREN DE TRATAMIENTO PARA EL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO “LAS IGUANAS” DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 29 días del mes de junio del año 2013**

**LA AUTORA:**

---

**Ángela Jacqueline, Quevedo Asanza**

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi agradecimiento:

Al Consorcio ILM Las Iguanas, por todas las facilidades brindadas para poder realizar mi trabajo de grado.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (USGC), por la formación recibida.

A mi tutor de Trabajo de grado, Ing. Fabián Neira Ruiz, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la elaboración de este trabajo.

Al Ing. Mario García, por el tiempo dedicado a este trabajo de grado.

A mi esposo Luis e hija Jelena por permitir ausentarme en momentos de nuestra vida familiar y apoyarme en la culminación de mí trabajo de grado; los amo.

A mis padres, Marcelo y Bertha, por todo el apoyo y la confianza que depositaron en mi, desde el inicio hasta el final de mi carrera; y por la comprensión que me han dado.

A mis hermanos Iván y Kelly, por su ayuda cuando fue necesario durante esta etapa de mi vida.

A mi compañero y mejor amigo, Ing. Fernando Pardo, por su amistad, lealtad y ayuda desinteresada, la cual fue fundamental para poder terminar mi vida universitaria. Te quiero mucho “Parduchis”

Pero sobretodo a mi Dios todopoderoso, por darme la fortaleza, sabiduría y salud para culminar esta etapa de mi vida ya que sin su ayuda no hubiera podido lograr este triunfo tan añorado.

**Ángela Jacqueline Quevedo Asanza**

## **DEDICATORIA**

A mi amor chiquito, mi hija Jelenita por ser la fuente de mi inspiración y motivación para superarme cada día y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor. Te amo

**Ángela Jacqueline Quevedo Asanza**

## **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**ING. FABIAN NEIRA RUIZ  
PROFESOR TUTOR**

---

**ING. MARIO GARCÍA CRUZ  
PROFESOR DELEGADO**





**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CALIFICACIÓN**

---

**ING. FABIAN NEIRA RUIZ  
PROFESOR TUTOR**

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS Y ALCANCES .....</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivo específico .....	3
2.3. Alcances .....	3
<b>3. MARCO TEORICO.....</b>	<b>4</b>
3.1. El relleno sanitario como sitio de disposición final de desechos sólidos .....	4
3.1.1. Tipos de rellenos sanitarios.....	8
3.1.2. Características de los desechos sólidos.....	11
3.1.3.1. Biodegradabilidad de los residuos sólidos urbanos .....	14
3.2. Lixiviado de un relleno sanitario .....	16
3.2.1. Generación de Lixiviados .....	17
3.2.2. Características del lixiviado de un relleno sanitario .....	23
3.3. Procesos usados para el tratamiento de lixiviados.....	30
3.3.1. Procesos Biológicos.....	30
3.3.1.1. Procesos aerobios.....	30
3.3.1.2. Proceso anaerobio .....	32
3.3.2. Evaporación .....	34
3.3.3. Recirculación de los lixiviados.....	36
3.3.4. Sistemas de Membranas.....	37
3.3.4.1. Biorreactores con membrana MBR.....	37
3.3.4.2. Ósmosis Inversa.....	38
3.3.5. Sistemas Naturales .....	39
3.3.6. Sistema PTAR .....	41
3.3.7. Comparación de los diferentes procesos de tratamiento .....	42
3.3.8. Problemas en el tratamiento de lixiviados .....	46
3.4. Reactor anaerobio de flujo ascendente USAB .....	47
3.4.1. Parámetros de diseño para un reactor anaerobio UASB .....	51
3.4.1.1. Características del Agua Residual.....	51
3.4.1.2. Carga Orgánica Volumétrica.....	51
3.4.1.3. Velocidad de flujo ascendente .....	53
3.4.1.4. Dimensionamiento del Reactor anaerobio UASB.....	54
3.4.1.4.1. Determinación del volumen nominal y efectivo del reactor. ....	54
3.4.1.4.2. Características físicas a considerar en el dimensionamiento.....	56
3.5. Selección de procesos para el tratamiento de lixiviados.....	59

<b>4. MARCO LEGAL</b> .....	<b>62</b>
4.1. Normativa Ecuatoriana para la descarga de efluentes .....	63
4.1.1. Texto unificado de legislación secundaria ambiental de la republica del Ecuador, libro VI anexo 1: Norma de Calidad ambiental, para la descarga de efluentes: Recurso agua. ....	63
4.1.2. Texto unificado de legislación secundaria ambiental de la republica del Ecuador, libro VI anexo 6: Manejo de desechos sólidos no peligrosos.....	65
<b>5. EL RELLENO SANITARIO</b> .....	<b>67</b>
5.1. Descripción del relleno sanitario “Las Iguanas” .....	67
5.2. Calidad de lixiviados en el relleno sanitario “Las Iguanas” .....	71
<b>6. METODOLOGIA</b> .....	<b>111</b>
6.1. Análisis estadístico de la calidad físico química del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas”. ....	111
6.2. Factibilidad de uso de un reactor UASB como tratamiento secundario biológico. ....	113
6.3. Dimensionamiento del Reactor UASB.....	113
6.4. Eficiencias esperadas. ....	115
<b>7. RESULTADOS</b> .....	<b>116</b>
7.1. Rangos promedio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas” .....	116
7.2. Evaluación teórica de factibilidad de un reactor UASB.....	118
7.3. Diseño del reactor UASB .....	118
7.4. Planos del reactor UASB: Alzado, planta y 3D. ....	123
<b>8. CONCLUSIONES</b> .....	<b>127</b>
<b>9. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>128</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>130</b>
<b>11. ANEXOS</b> .....	<b>132</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de un relleno sanitario.....	5
Tabla 2. Composición física de los desechos sólidos en rango porcentual.....	12
Tabla 3. Composición química de los desechos sólidos en rango porcentual. ....	12
Tabla 4. Biodegradabilidad de algunos materiales orgánicos de los RSU.....	16
Tabla 5. Precipitación pluvial en los rellenos sanitarios .....	22
Tabla 6. Características físico-químicas típicas de un lixiviado en las etapas de un relleno. .	24
Tabla 7. Comparación de las características típicas de un lixiviado joven y un lixiviado viejo	25
Tabla 8. Características físico-químicas típicas de un lixiviado.....	26
Tabla 9. Características físico-químicas del lixiviado en el mundo .....	28
Tabla 10. Características de los metales pesados en el lixiviado .....	29
Tabla 11. Variación de las características del lixiviado con respecto al tiempo .....	29
Tabla 12. Ventajas y desventajas del proceso aerobio .....	32
Tabla 13. Ventajas y desventajas del proceso anaerobio.....	33
Tabla 14. Rendimiento de procesos de Recirculación de lixiviados.....	37
Tabla 15. Rendimiento de lagunas en rellenos sanitarios .....	40
Tabla 16. Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados . ....	43
Tabla 17. Comparación entre complejidad de tecnologías para el tratamiento de lixiviados	44
Tabla 18. Comparación de rendimientos para el tratamiento de lixiviados.....	45
Tabla 19. Rendimientos de reactores UASB en tratamiento de lixiviados .....	48
Tabla 20. Ventajas y desventajas del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente USAB .....	50
Tabla 21. Carga volumétrica recomendada para reactores UASB para lograr una carga de remoción DQO de 85 a 90%.....	52
Tabla 22. Carga volumétrica recomendada para reactores UASB con relación a la temperatura.....	53
Tabla 23. Velocidad de flujo ascendente y tiempo de retención hidráulica (TRH).....	54
Tabla 24. Tiempo de retención hidráulica (TRH) recomendado para el tratamiento de aguas residuales domestica. ....	54

Tabla 25. Directrices para dimensionar el área servida por los tubos de alimentación de entrada de reactor UASB. ....	57
Tabla 26. Características físicas a considerar en un reactor UASB. ....	58
Tabla 27. Límites de descargas al sistema de alcantarillado público.....	63
Tabla 28. Comparación de las características físico-químicas típicas con las normas permisibles.....	66
Tabla 29. Composición de los residuos sólidos del relleno sanitario “Las Iguanas”.....	68
Tabla 30. Datos del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas” sector D. ....	70
Tabla 31. Datos del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas” sector A. ....	70
Tabla 32. Datos del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas” sector C .....	70
Tabla 33. Clasificación del agua de acuerdo a la dureza.....	86
Tabla 34. Parámetros usados en el análisis del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas”	111
Tabla 35. Procesos usuales y datos sobre el desempeño de los procesos anaerobios. ....	116
Tabla 36. Valores promedio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario "Las Iguanas" .	117

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de formación de lixiviados.....	2
Figura 3. Vista transversal del manejo de líquidos y gases en un relleno sanitario .....	6
Figura 2. Operación de un relleno sanitario .....	6
Figura 4. Operación de un relleno sanitario .....	7
Figura 5. Relleno Sanitario tipo área.....	8
Figura 6. Relleno Sanitario tipo zanja o trinchera.....	10
Figura 7. Relleno Sanitario tipo combinado o rampa .....	10
Figura 8. Método del cuarteo para las características de los desechos sólidos .....	11
Figura 9. Etapas de descomposición del relleno sanitario.....	14
Figura 10. Lixiviado en un relleno sanitario .....	17
Figura 11. Producción diaria de lixiviado en el relleno sanitario .....	18
Figura 12. Balance hídrico en un relleno sanitario .....	20
Figura 13. Manejo y eliminación de lixiviados mediante tratamiento de evaporación. ....	35
Figura 14. Tren de tratamiento clásico para aguas residuales. ....	42
Figura 15. Esquema general de un reactor UASB .....	49
Figura 16. Posible Configuración de unidad de entrada de influente al reactor UASB .....	56
Figura 17. Esquema de un tren de tratamiento de lixiviados.....	59
Figura 18. Rejilla de limpieza manual .....	60
Figura 19. Vista en planta y corte longitudinal de un sedimentador .....	61
Figura 20. Operación del relleno sanitario "Las Iguanas" .....	69

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Variación mensual de pH, sector A.....	71
Gráfica 2. Variación mensual de pH, Sector C.....	72
Gráfica 3. Variación mensual de pH, Sector D .....	72
Gráfica 4. Variación mensual de Conductividad, Sector A.....	73
Gráfica 5. Variación mensual de Conductividad, Sector C.....	73
Gráfica 6. Variación mensual de Conductividad, Sector D.....	74
Gráfica 7. Variación mensual de Residuos Sedimentales, Sector A.....	75
Gráfica 8. Variación mensual de Residuos Sedimentales, Sector C.....	75
Gráfica 9. Variación mensual de Residuos Sedimentales, Sector D.....	76
Gráfica 10. Variación mensual de Residuos Totales, Sector A.....	76
Gráfica 11. Variación mensual de Residuos Totales, Sector C.....	77
Gráfica 12. Variación mensual de Residuos Totales, Sector D.....	77
Gráfica 13. Variación mensual de Residuos suspendidos, Sector A .....	78
Gráfica 14. Variación mensual de Residuos suspendidos, Sector C.....	78
Gráfica 15. Variación mensual de Residuos suspendidos, Sector D .....	79
Gráfica 16. Variación mensual de DQO, Sector A .....	79
Gráfica 17. Variación mensual de DQO, Sector C .....	80
Gráfica 18. Variación mensual de DQO, Sector D .....	80
Gráfica 19. Variación mensual de la DBO, Sector A.....	81
Gráfica 20. Variación mensual de la DBO, Sector C .....	81
Gráfica 21. Variación mensual de la DBO, Sector D.....	82
Gráfica 22. Variación mensual de la Temperatura, Sector A.....	82
Gráfica 23. Variación mensual de la Temperatura, Sector C .....	83
Gráfica 24. Variación mensual de la Temperatura, Sector D.....	83
Gráfica 25. Variación mensual de Caudal, Sector A.....	84

Gráfica 26. Variación mensual de Caudal, Sector C.....	84
Gráfica 27. Variación mensual de Caudal, Sector D.....	85
Gráfica 28. Variación mensual de Dureza Total, Sector A .....	86
Gráfica 29. Variación mensual de Dureza Total, Sector C.....	86
Gráfica 30. Variación mensual de Dureza Total, Sector D .....	87
Gráfica 31. Variación mensual de Dureza Cálctica, Sector A .....	87
Gráfica 32. Variación mensual de Dureza Cálctica, Sector C.....	88
Gráfica 33. Variación mensual de Dureza Cálctica, Sector D .....	88
Gráfica 34. Variación mensual de Dureza magnésica, Sector A .....	89
Gráfica 35. Variación mensual de Dureza magnésica, Sector C.....	89
Gráfica 36. Variación mensual de Dureza magnésica, Sector D .....	90
Gráfica 37. Variación mensual de Amoniaco, Sector A.....	90
Gráfica 38. Variación mensual de Amoniaco, Sector C.....	91
Gráfica 39. Variación mensual de Amoniaco, Sector D. ....	91
Gráfica 40. Variación mensual de Amonio, Sector A .....	92
Gráfica 41. Variación mensual de Amonio, Sector C .....	92
Gráfica 42. Variación mensual de Amonio, Sector D .....	93
Gráfica 43. Variación mensual del Nitrógeno Total, Sector A .....	93
Gráfica 44. Variación mensual del Nitrógeno Total, Sector C.....	94
Gráfica 45. Variación mensual del Nitrógeno Total, Sector D .....	94
Gráfica 46. Variación mensual de Fósforo Total, Sector A .....	95
Gráfica 47. Variación mensual de Fósforo total, Sector C .....	95
Gráfica 48. Variación mensual de Fósforo total, Sector D.....	96
Gráfica 49. Variación mensual de Cloruro, Sector A.....	96
Gráfica 50. Variación mensual de cloruro, Sector C .....	97
Gráfica 51. Variación mensual de cloruro, Sector D .....	97
Gráfica 52. Variación mensual de Sulfatos, Sector A.....	98



Gráfica 53. Variación mensual de Sulfatos, Sector C .....	98
Gráfica 54. Variación mensual de Sulfatos, Sector D.....	99
Gráfica 55. Variación mensual de Hierro, Sector A.....	99
Gráfica 56. Variación mensual de Hierro, Sector C.....	100
Gráfica 57. Variación mensual de Hierro, Sector D .....	100
Gráfica 58. Variación mensual de Sodio, Sector A.....	101
Gráfica 59. Variación mensual de Sodio, Sector C.....	101
Gráfica 60. Variación mensual de Sodio, Sector D.....	102
Gráfica 61. Variación mensual de Plomo, Sector A.....	102
Gráfica 62. Variación mensual de Plomo, Sector C.....	103
Gráfica 63. Variación mensual de Plomo, Sector D .....	103
Gráfica 64. Variación mensual de Cobre, Sector A .....	104
Gráfica 65. Variación mensual de Cobre, Sector C .....	104
Gráfica 66. Variación mensual de Cobre, Sector D .....	105
Gráfica 67. Variación mensual de Zinc, Sector A .....	105
Gráfica 68. Variación mensual de Zinc, Sector C.....	106
Gráfica 69. Variación mensual de Zinc, Sector D .....	106
Gráfica 70. Variación mensual de Cadmio, Sector A.....	107
Gráfica 71. Variación mensual de Zinc, Sector C.....	107
Gráfica 72. Variación mensual de Zinc, Sector D .....	108
Gráfica 73. Variación mensual de Cromo Hexavalente, Sector A.....	108
Gráfica 74. Variación mensual de Cromo Hexavalente, Sector C .....	109
Gráfica 75. Variación mensual de Cromo Hexavalente, Sector D.....	109
Gráfica 76. Variación mensual de MBAS, Sector A .....	110
Gráfica 77. Variación mensual de MBAS, Sector C .....	110
Gráfica 78. Variación mensual de MBAS, Sector D .....	111

## RESUMEN (ABSTRACT)

Los lixiviados de un relleno sanitario se producen por la descomposición de los desechos orgánicos, la liberación de la humedad inicial contenida en los desechos y la interacción entre el agua superficial infiltrada al relleno sanitario, las precipitaciones y la basura depositada. Es uno de los principales contaminantes de fuentes de aguas, tanto superficiales como subterráneas y, en muchos casos, su tratamiento no adecuado puede ser el fracaso de un relleno sanitario.

Este trabajo de grado, se enfocará en evaluar la factibilidad y diseño de un reactor anaerobio UASB como tratamiento anaerobio. Para lograr estos objetivos, se obtuvieron datos reales de las características físico-químicas del lixiviado; lográndose valores promedios, luego el análisis estadístico con respecto al tiempo e información de reactores UASB con eficiencias probadas.

Se realizó una evaluación de la calidad del efluente esperado luego del tratamiento, en relación a los parámetros establecidos por la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes vigente en el Ecuador. Con estos resultados, se efectuó un diagnóstico de la situación, y se propusieron alternativas que cumplan tanto con la capacidad requerida, como con la calidad esperada con el fin de evitar la contaminación y el impacto ambiental.

Los datos obtenidos permiten establecer el diseño del reactor UASB como tratamiento secundario biológico con eficiencias de remoción del 60-80%, estando dentro de los límites permitidos de descarga a un sistema de alcantarillado. Se dimensionó con los parámetros más importantes que son: las características de aguas residuales, carga orgánica volumétrica y velocidad de flujo ascendente

**Palabras Claves:** Lixiviado, Relleno sanitario, Reactor UASB, Tratamiento, Calidad del efluente, Diseño.

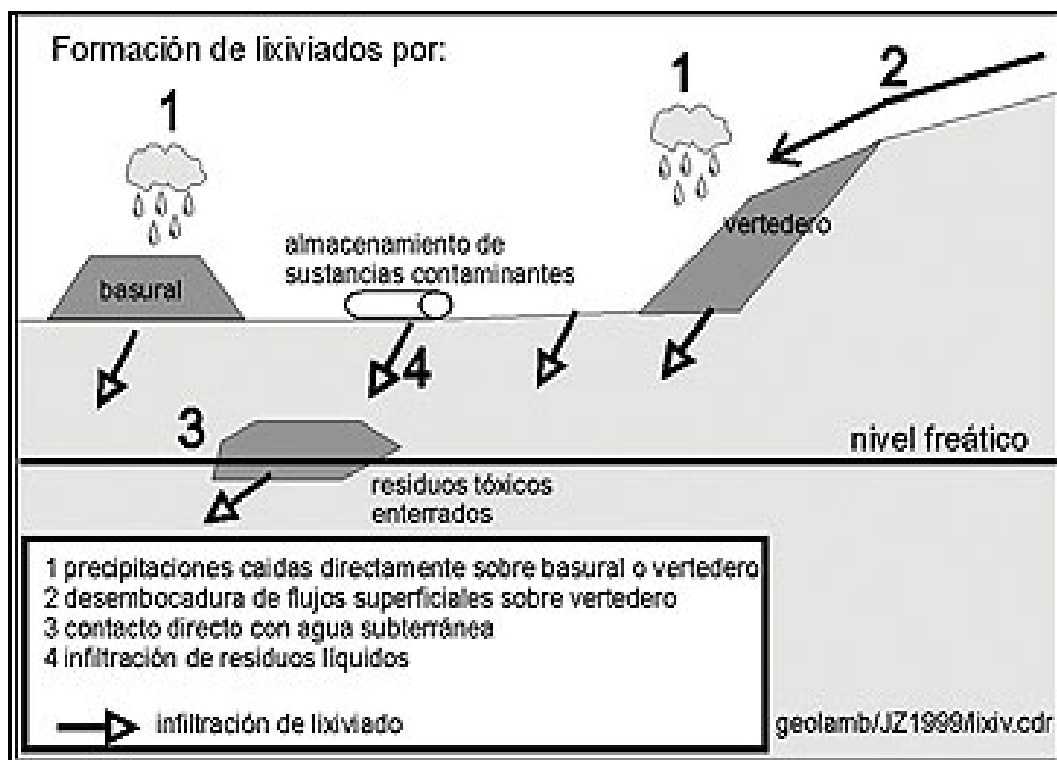
## 1. INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios constituyen una alternativa adecuada y efectiva para la disposición de los residuos sólidos urbanos de una ciudad, su uso es todavía generalizado en países con un desarrollo económico similar al nuestro; sin embargo es necesario realizar una operación adecuada de los sitios de disposición final para minimizar los efectos sobre el medioambiente debido a la producción de gases (biogás) y lixiviados.

Los lixiviados de un relleno sanitario se producen por la descomposición de los desechos orgánicos, la liberación de la humedad inicial contenida en los desechos y la interacción entre el agua superficial infiltrada al relleno sanitario, las precipitaciones y la basura depositada, como se observa en la *Figura 1*. Las características físico-químicas, biológicas y microbiológicas del lixiviado de un relleno varían de acuerdo con el tiempo de operación del mismo y con la época del año. Usualmente los lixiviados presentan un alto contenido de materia orgánica, de nitrógeno, fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos; estas características definirán en gran parte el tipo de tratamiento que hay que llevar a cabo sin embargo hay que definir otras condiciones que influyen en la selección de la tecnología a utilizar para el tratamiento, como son: biodegradabilidad (relación DBO/DQO) de la materia orgánica, concentraciones de sales disueltas y metales pesados (que generan problemas de toxicidad al querer utilizar un tratamiento biológico para remover el DBO), concentraciones de calcio y magnesio (dureza,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) que pueden generar problemas de incrustaciones y taponamiento de conductos y tuberías, pH que en el caso de ser bajo puede interferir con el desarrollo de procesos como la nitrificación.

En la actualidad los avances en el tratamiento de lixiviados incluyen alternativas como la evaporación, el tratamiento por procesos de membrana y sistemas de

tratamiento natural como lagunas y humedales; entre los procesos biológicos de tratamiento ampliamente utilizados están los reactores anaerobios de tipo UASB y sistemas aerobios como lodos activados. La selección de la tecnología adecuada para el tratamiento del lixiviado dependerá de las eficiencias teóricas que se pueden obtener con el tratamiento y del costo del mismo por metro cúbico de lixiviado tratado.



**Figura 1. Proceso de formación de lixiviados**

*Fuente:* (Luna & Salminci, 2008)

## **2. OBJETIVOS Y ALCANCES**

### **2.1. Objetivo general**

Diseñar un reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente (UASB), mediante el criterio de tiempo de retención hidráulica como una alternativa técnica adecuada para el tratamiento del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas”.

### **2.2. Objetivo específico**

- Reconocer teóricamente la factibilidad técnica de un proceso de tratamiento biológico anaerobio para el lixiviado.
- Diseñar un reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente (UASB).

### **2.3. Alcances**

Se realizará el dimensionamiento y diseño de un sistema de tratamiento biológico anaerobio UASB para el relleno sanitario “Las Iguanas” de la ciudad de Guayaquil, basado en condiciones técnicas y teóricas.

### **3. MARCO TEORICO**

#### **3.1. El relleno sanitario como sitio de disposición final de desechos sólidos**

El relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que cumple rigurosas condiciones en cuanto a mecánica de suelos, hidrología, distancias, vientos y una serie de estipulaciones ambientales, no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica al ambiente durante su operación, ni después de su clausura. Se utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en una área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen (*Figura 2*). Proporciona estrategias para el manejo de los problemas que puedan causar los líquidos (lixiviados) y gases (biogás) producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica (*Figura 3*).

En Estados Unidos, surgió el relleno sanitario como resultado de las experiencias, de compactación y cobertura de los residuos con equipo pesado; desde entonces, se emplea este término para aludir al sitio en el cual los residuos son depositados y cubiertos al final de cada día de operación.

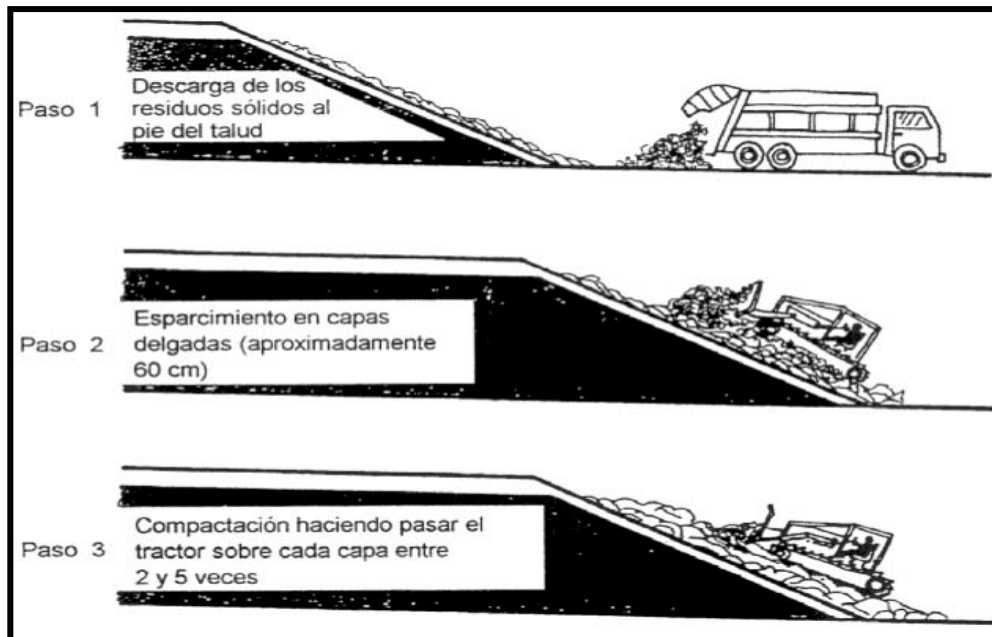
En la actualidad, el relleno sanitario se refiere a una instalación diseñada y operada como una obra de saneamiento básico, que cuenta con elementos de control lo suficientemente seguros y cuyo éxito radica en la adecuada selección del sitio, en su diseño y, por supuesto, en su óptima operación y control como se observa en la *Figura 4*.

A continuación, en la *Tabla 1*, mencionaremos las ventajas y desventajas de un relleno sanitario como disposición final de desechos sólidos.

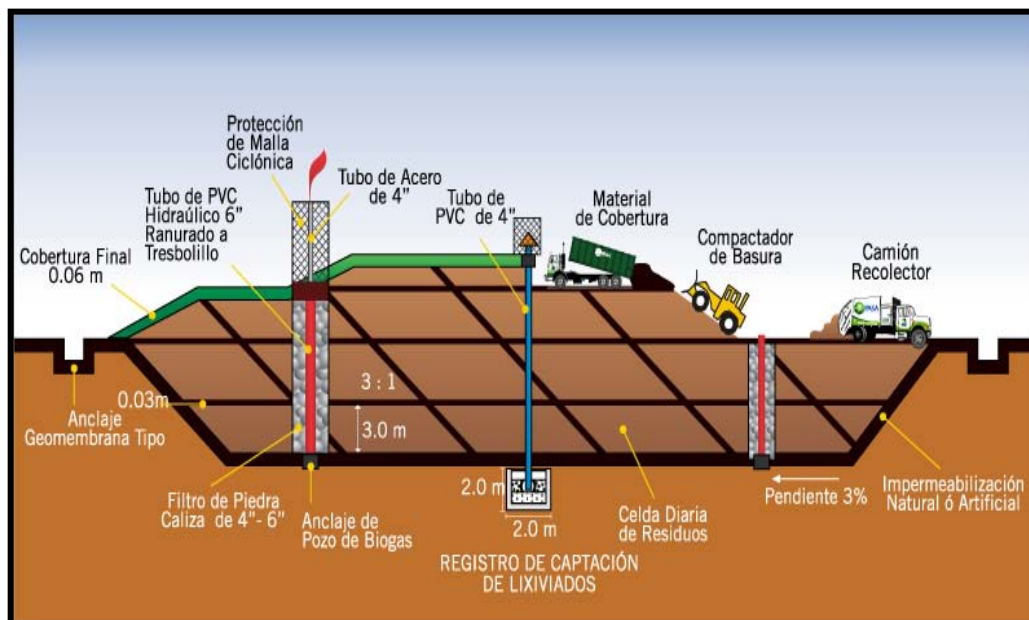
**Tabla 1. Ventajas y desventajas de un relleno sanitario.**

<b>VENTANAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Donde hay terreno disponible, un relleno sanitario es generalmente el método más económico de disposición</li><li>2. La inversión inicial es baja, comparada con otros métodos de disposición</li><li>3. Un relleno sanitario es un método completo o final de disposición en comparación con incineración y fermentación que requieren tratamiento adicional u operaciones de disposición para el residuo, agua de proceso, materiales inutilizables, etc.</li><li>4. Un relleno sanitario puede recibir todo tipo de desechos, eliminando la necesidad de recolecciones separadas.</li><li>5. Un relleno sanitario es flexible; se pueden disponer cantidades mayores de desechos sólidos con poco personal y equipo adicional.</li><li>6. Se puede reclamar tierra submarginal para ser usada como parqueadero, campos de juego, golf, aeropuerto, etc.</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. En áreas muy pobladas puede no haber tierras apropiadas disponibles dentro de la distancias de acarreo económico.</li><li>2. Se deben observar las normas apropiadas de rellenos sanitarios a diario o puede resultar un botadero o campo abierto.</li><li>3. Los rellenos sanitarios ubicados en áreas residenciales pueden provocar oposición pública extrema.</li><li>4. Un relleno sanitario terminado se asentará y exigirá mantenimiento periódico</li><li>5. Se debe utilizar un diseño y construcción especial para edificios erigidos sobre rellenos sanitarios debido al factor de asentamiento.</li><li>6. El metano, un gas explosivo y otros gases de la descomposición de los desechos, pueden convertirse en un peligro o molestia e interferir con el uso del relleno sanitario terminado.</li></ol>

*Fuente:* (Tchobanoglous, Theisen, & Eliassen, 1977)



**Figura 2. Operación de un relleno sanitario**  
*Fuente: (Chang Gómez, 2008)*



**Figura 3. Vista transversal del manejo de líquidos y gases en un relleno sanitario**  
*Fuente: (Ingenieros Inc., 2008)*





**Figura 4. Manejo de los desechos sólidos en un relleno sanitario**  
*Fuente: (Consortio-ILM "Las Iguanas", 2012)*

### 3.1.1. Tipos de rellenos sanitarios

En la actualidad existen varios tipos de rellenos sanitarios; cada uno depende básicamente de la topografía del terreno, de la potencialidad del material de cobertura del tipo de suelo y la profundidad del nivel freático.

**Relleno sanitario tipo área.-** Normalmente se emplea cuando se dispone de terrenos con cavidades de cierto tamaño, depresiones naturales u hondonadas artificiales producidas artificialmente por la explotación de canteras, pozos para la extracción de materiales (ripió, arena, arcilla), lugares pantanosos o marismas, terrenos adyacentes a los ríos u otros similares.

En estos casos, el material de cobertura debe ser transportado de otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial. Las fosas se construyen con pendiente suave en el talud para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el relleno (*Figura 7*).

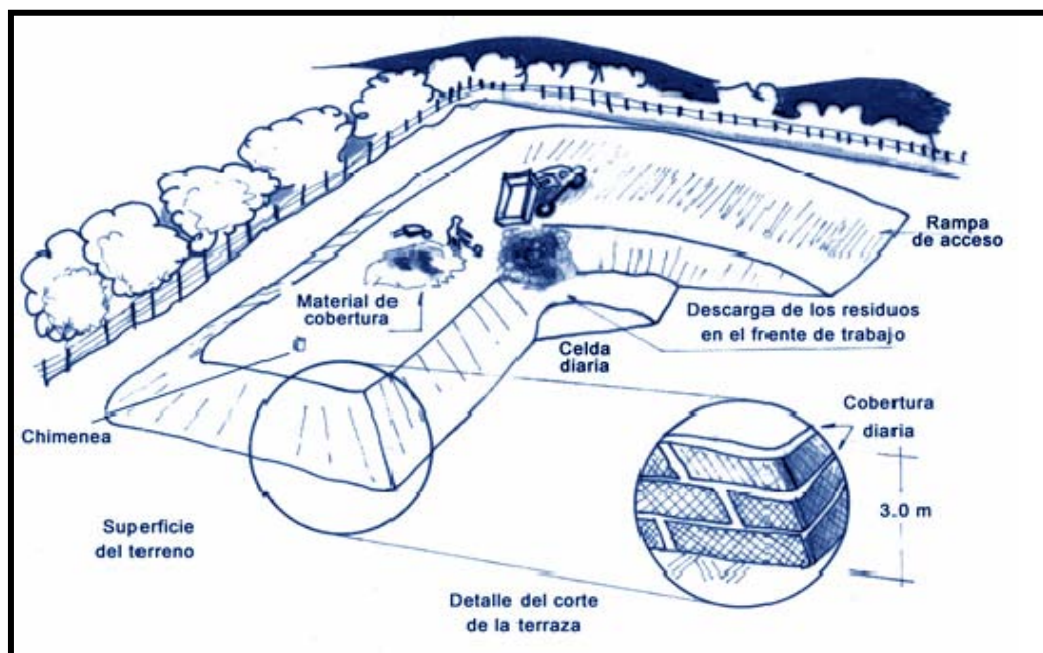


Figura 5. Relleno Sanitario tipo área

Fuente: (Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud, 2002)

**Relleno sanitario tipo trinchera o zanja.-** Este tipo de relleno sanitario es probablemente uno de los más prácticos o apropiados, ya que este método se utiliza en terrenos planos, su operación es sencilla y la escasez de material de recubrimiento no produce problemas, siempre que el terreno para este sistema de disposición final sea convenientemente elegido.

Consiste en excavar periódicamente zanjas de dos o tres metros de profundidad con retroexcavadora o tractor de oruga, acumulando a un lado el material de excavación para usarlo posteriormente como material de cobertura, situación que se puede observar en la *Figura 6*.

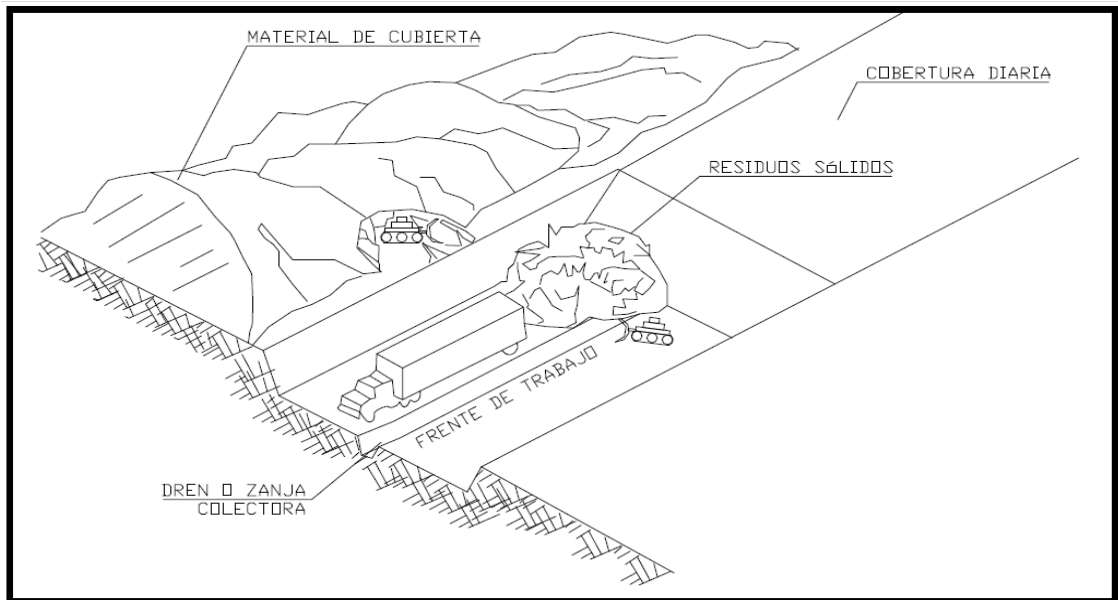
El ancho es de por lo menos, el doble del tamaño del equipo de trabajo para facilitar su operación (4 a 10 m de ancho).

Se debe tener especial cuidado en periodos lluviosos dado que las aguas pueden inundar las zanjas, de ahí que se deba construir canal perimetral para captarlas y desviarlas, incluso proveer a las zanjas de drenajes internos. Sus taludes o paredes deben perfilarse de acuerdo con el ángulo de reposo del suelo excavado.

La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo. Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie, no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero (OPS/OMS, 2002).

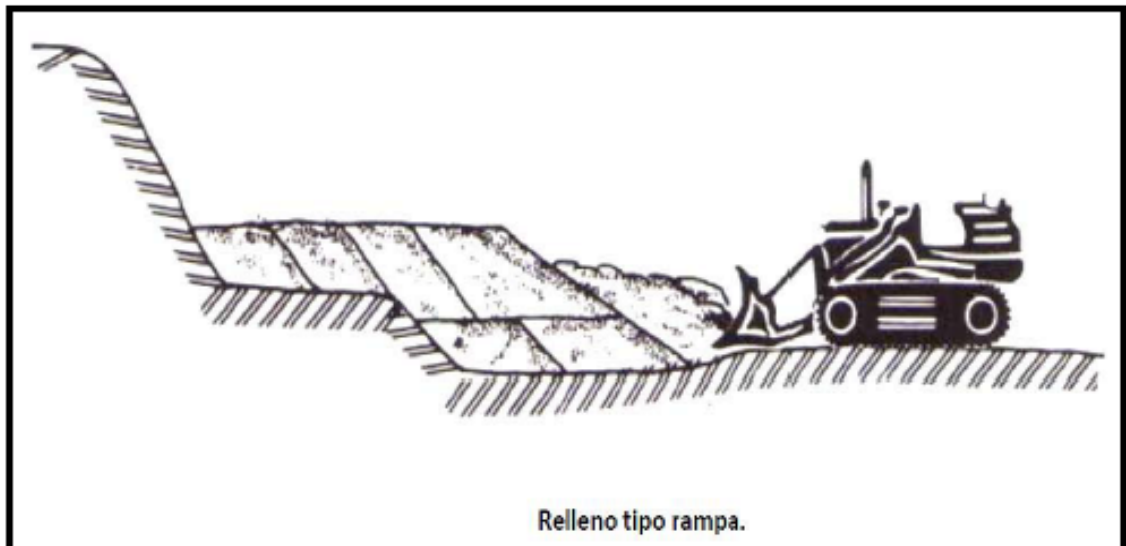
**Relleno sanitario tipo combinado o rampa.-** Este tipo de relleno se opera similar a los rellenos de área y zanja, pero los desperdicios descargados se extienden en una rampa, se aplastan y recubren diariamente con una capa de material de 0.15 m. de espesor; terminada esta operación la rampa debe tener una pendiente de 30 m. y alcanzando el nivel previsto, se recubre con una capa de tierra o material similar de 0.60 m. de espesor. El método se utiliza en terrenos de declive moderado o en aquellos que tienen una capa delgada de

material susceptible de ser usado para recubrimiento o como sello del relleno  
*Figura 7.*



**Figura 6. Relleno Sanitario tipo zanja o trinchera**

*Fuente:*(Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud, 2002)



**Figura 7. Relleno Sanitario tipo combinado o rampa**

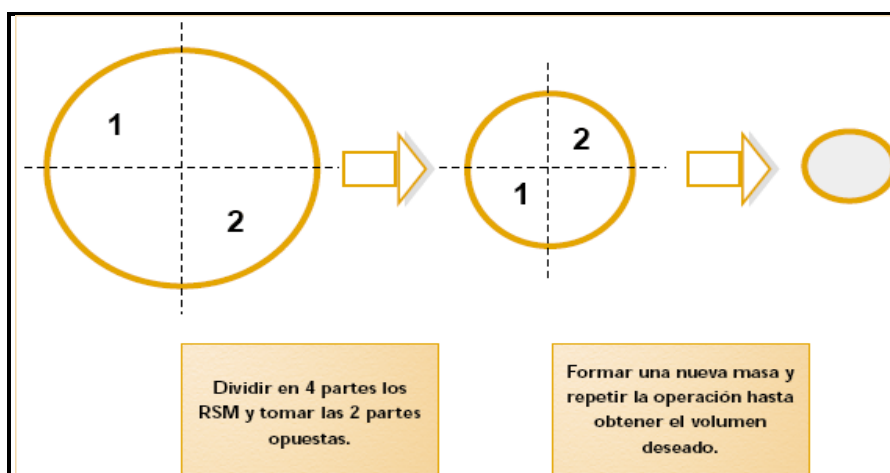
*Fuente:*(Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud, 2002)

### 3.1.2. Características de los desechos sólidos

Para realizar el diseño de un relleno sanitario y calcular la producción de gases y lixiviados es necesario conocer la composición física y química de los desechos sólidos que llegarán al relleno sanitario, siendo muy importante el porcentaje de materia orgánica sobre el total de la basura. Normalmente la composición física y química se determina por porcentaje en peso del total, como se observa en la *Tabla 2*.

Esta composición generalmente se determina mediante técnicas estadísticas como se muestra en la *Figura 8* donde la técnica del cuarteo consiste en vaciar la basura en un sitio firme y limpio, volteando de manera que la mezcla se haga homogénea; se acumula formando un círculo de diámetro aproximado de cuatro metros y se divide en 4 partes iguales.

Se escogen dos cuartos opuestos y se repite la operación, una vez obtenido el peso para el muestreo se selecciona los materiales en forma manual y se colocan en recipientes separados, se pesa y, por diferencia, se conoce el peso del componente (Collazos Peñaloza, 2008).



**Figura 8. Método del cuarteo para las características de los desechos sólidos**

*Fuente:* (Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud, 2002)

La composición química se determina mediante el mismo proceso del cuarteo, hasta obtener un cuarto del análisis físico y ser triturado de manera que pase por un tamiz con malla de cuatro centímetros, los elementos que no pasan por el tamiz se desechan. Una vez preparada la muestra se envía al laboratorio, donde previo análisis determinan el pH, la humedad, carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre como se detalla en la *Tabla 3*.

**Tabla 2. Composición física de los desechos sólidos en rango porcentual.**

<b>ELEMENTO</b>	<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>
Residuos de alimentos	37,0	6,0	59,0
Papel y cartón	23,0	41,0	10,0
Plásticos	9,0	10,7	8,0
Textiles	4,0	2,4	2,0
Caucho	4,0	2,5	*
Madera	5,0	5,0	5,0
Vidrio	8,0	5,8	2,0
Metales	5,0	7,9	2,0
Otros	5,0	1,0	10,0
Poda	*	17,7	2,0
<b>Totales</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

(1) COLOMBIA. PIR, Universidad nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, 1989

(2) ESTADOS UNIDOS. G. Tchobanoglous et al, Gestión Integral de residuos sólidos, 1994

(3) GUAYAQUIL. H. Collazos, Relleno sanitario las Iguanas, 1992

*Fuente:* (Collazos Peñaloza, 2008)

**Tabla 3. Composición química de los desechos sólidos en rango porcentual.**

<b>Elementos</b>	<b>Rango (% en peso seco)</b>
Carbono	25-35
Hidrogeno	2.5-6
Oxigeno	15-30
Nitrógeno	0.25-1.2
Sulfuro	0.02-0.12
Cenizas	12-30

*Fuente:* (Pfeffer, 1992)

### **3.1.3. Descomposición de los desechos sólidos en rellenos sanitarios**

La descomposición bacteriana de desechos sólidos empieza tan pronto es colocado en el relleno sanitario, en algunos casos ocurre en condiciones aerobias debido a la cantidad de aire atrapado en el relleno y la descomposición a largo plazo, una vez agotado el gas se da bajo condiciones anaerobias.

La tasa de descomposición en condiciones normales, medida por la producción de gas, alcanza un valor pico dentro de los primeros dos años y entonces disminuye lentamente, continuando en muchos casos durante periodos hasta de 25 años o más. Si no se agrega humedad a los desechos en un relleno bien compactado, no es raro encontrar materiales en su forma original años después de haber sido enterrados.

El proceso de descomposición de un relleno sanitario sigue 5 etapas sucesivas. La duración de cada fase depende de la distribución de los componentes orgánicos en el relleno, el contenido de nutrientes, la humedad de los residuos, el paso de la humedad por el relleno y el grado de compactación inicial; como se muestra en *Figura 9* (Robles Martinez, 2008).

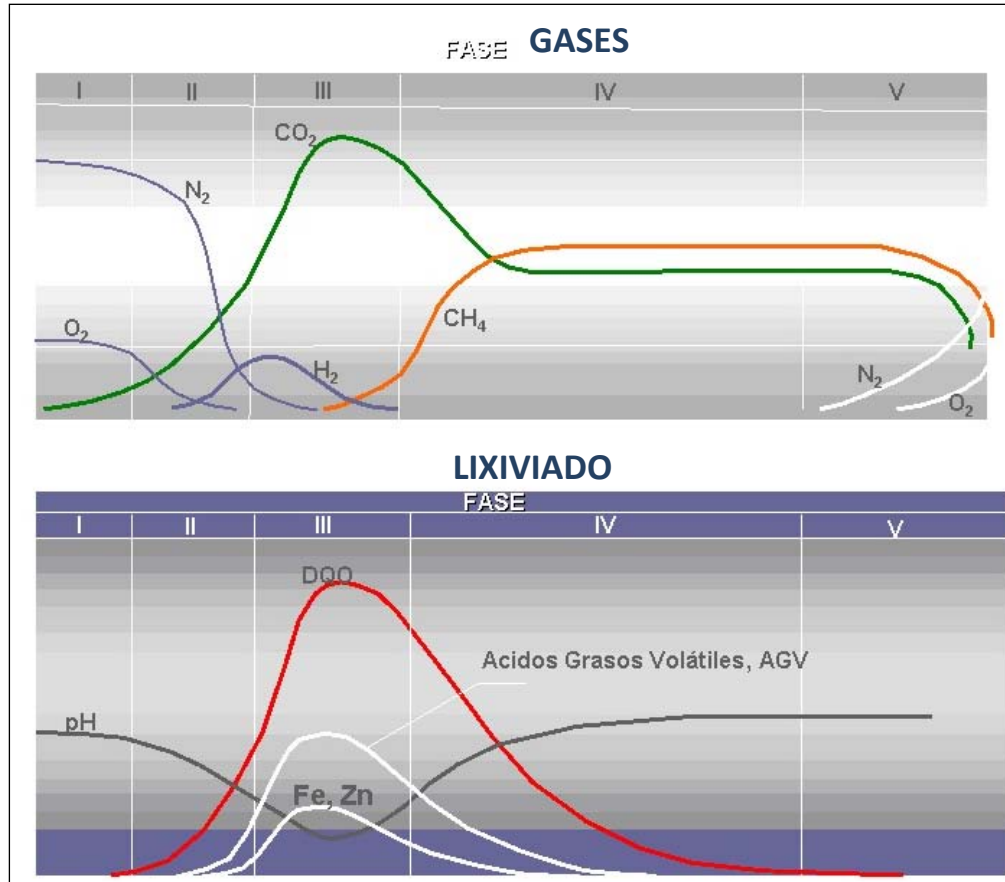
*Fase I:* Disposición de los residuos (formación y llenados de celdas)

*Fase II:* Cambio progresivo a condiciones de anaerobiosis, caída del potencial redox (reducción de oxidación).

*Fase III:* Hidrólisis y acidogénesis, baja el pH, unión de metales y carga orgánica de lixiviados elevada.

*Fase IV:* Acetogénesis y metanogénesis, sube progresivamente el pH, disminución de la carga orgánica de los lixiviados, alta producción de biogás rico en metano.

Fase V: Maduración del sitio, estabilización de la materia orgánica, caída de la producción de biogás consecuencia el agotamiento de los sustratos.



**Figura 9. Etapas de descomposición del relleno sanitario**

*Fuente:* (Ambientum, 2012)

### 3.1.3.1. Biodegradabilidad de los residuos sólidos urbanos

La caracterización microbiológica de los residuos sólidos urbanos (RSU), no es sencilla debido a la gran heterogeneidad de los residuos, pues tiene una gran variedad en cuanto al tamaño de partícula y a la biodegradabilidad de cada material presente, al contrario de los efluentes líquidos.

La degradación de los residuos sólidos es difícil de evaluar por indicadores indirectos simples como la demanda química de oxígeno (DQO) o bioquímica



de oxígeno (DBO). La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos comprende en papel, cartón, pero sobre todo material biodegradable donde se lleva a cabo la actitud microbiológica; la cantidad de materia orgánica biodegradable es un factor importante ya que de ello dependerá la cantidad de biogás que pueda generarse. Un alto porcentaje en materia orgánica no es favorable en el proceso de biodegradación; por ejemplo, en los sitios de disposición final donde se tiene una fuerte concentración de residuos alimentarios, se puede tener una inhibición en la producción de metano. (Wang et al., 1997).

En los sitios de almacenamiento temporal de los RSU, la actividad microbiológica y los riesgos de incendio y explosión, además de los problemas de generación de malos olores, depende directamente de la cantidad de materia orgánica fácilmente biodegradable presente en los mismos. Por otra parte, la cantidad de materia orgánica en la fracción de “finos” es muy importante debido a su tamaño de partícula que la hace más accesible al ataque de microorganismos, y por tanto más fácilmente biodegradable que las fracciones más grandes.

Baldit et al. (1985), reporta 32% de materia orgánica en la fracción de finos con granulometría inferior a 10 mm, Graindorge (1990), encontró que esta concentración puede llegar hasta 85%, en la misma fracción (Robles Martínez, 2008).

La biodegradabilidad puede variar por muchas cosas, tales como: la heterogeneidad de los residuos, variaciones ligadas a las estaciones del año, lugar de generación (país, ciudad, etc.) y clima propio de la región.

Para ejemplificar lo anterior mencionado, en un antiguo relleno sanitario se encontró una cantidad significativa de materia orgánica biodegradable 40 años después de haber depositado tales residuos (Robles Martínez, 2008).

En la tabla 4 se exponen los porcentajes de biodegradabilidad de diferentes materiales, es importante señalar que los resultados experimentales deben ser considerados como medidas de biodegradabilidad última.

**Tabla 4. Biodegradabilidad de algunos materiales orgánicos de los RSU**

<b>SUBSTRATO ORGANICO</b>	<b>% DE BIODEGRADABILIDAD</b>
Papel Periódico	24
Papel de oficina	83
Desechos de alimentos	83
Desechos de jardín	72

*Fuente:* (Robles Martinez, 2008)

### **3.2. Lixiviado de un relleno sanitario**

Los lixiviados se originan por la circulación de agua en la basura, la que a su paso va disolviendo los elementos presentes en los residuos. El resultado es un líquido altamente agresivo al ambiente, principalmente por sus elevadas cargas orgánicas representadas en parámetros de DQO en un rango de 10.000 a 30.000 mg/l, valor que depende del tipo de basura depositada y de la capacidad del relleno. Por esta razón los lixiviados representan el agente contaminante más significativo de un relleno sanitario. Adicionalmente estos líquidos no se quedan confinados en el relleno sanitario, sino que por las mismas condiciones de diseño del relleno, migran fuera del mismo pudiendo contaminar el suelo, las aguas superficiales y subterráneas que se encuentren a su paso (Giraldo, 1997).

La legislación Ecuatoriana en las normas sobre el manejo y disposición final de desechos sólidos no peligrosos define el lixiviado como líquido que percola a través de los residuos sólidos, compuesto por el agua proveniente de precipitaciones pluviales, escorrentías, la humedad de la basura y la

descomposición de la materia orgánica que arrastra materiales disueltos y suspendidos.

En la figura 12 se observa la formación del lixiviado en un relleno sanitario.

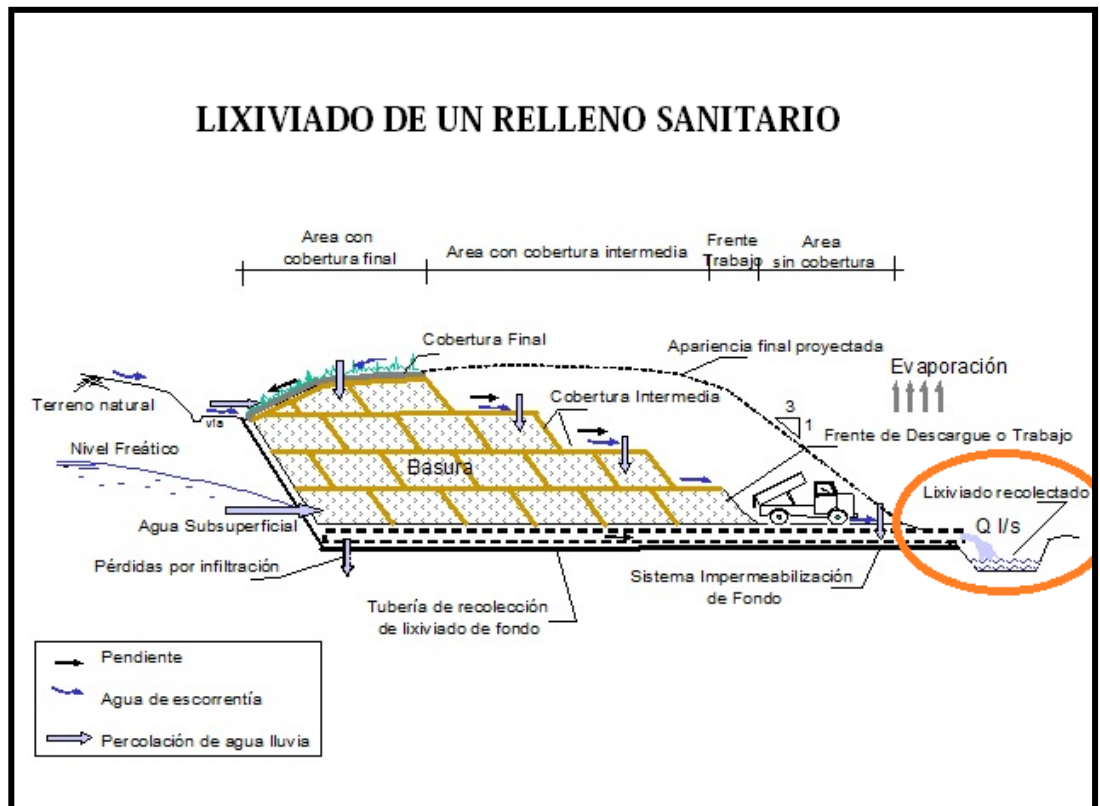


Figura 10. Lixiviado en un relleno sanitario

Fuente: (OPS/CEPIS, 2005)

### 3.2.1. Generación de Lixiviados

La generación de lixiviados en un relleno sanitario también es un punto importante a considerar en el momento de la selección del tratamiento. La cantidad producida de lixiviados se considera bajo tres variables principales: el área rellenada, la cantidad de infiltración que se permita, y el sistema de drenaje e impermeabilización (Figura 10).

El área rellena afecta porque es a través de ella que se realiza la entrada y el contacto del agua de infiltración con la basura. Al aumentar el área rellena, aumenta paralelamente la cantidad de lixiviados. Teniendo en cuenta que los rellenos son sistemas que duran décadas en su funcionamiento, considerando que la cantidad de lixiviados aumente, este aumento es un aumento gradual, lento, con los años (Figura11).

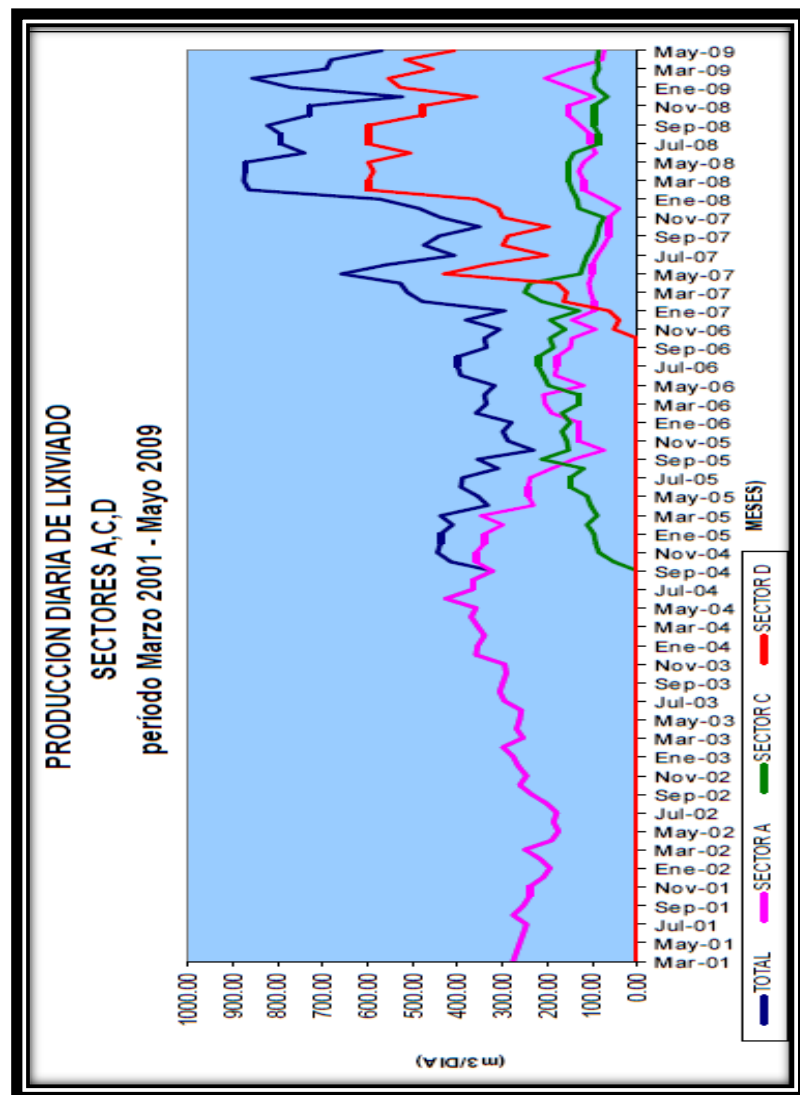


Figura 11. Producción diaria de lixiviado en el relleno sanitario

Fuente: (Consortio-ILM "Las Iguanas", 2012)

Por otra parte la cantidad de infiltración que se permita al relleno depende de numerosas variables tales como: la operación que se le dé al relleno como la desviación de aguas de escorrentía, la cantidad de precipitación directa que se tenga en la zona, la presencia de infiltraciones subterráneas y el material de cobertura. Usualmente las variaciones en la producción y calidad de los lixiviados asociadas a las infiltraciones, son variaciones rápidas, asociadas a la lluvia, y que hacen oscilar notablemente la cantidad de lixiviados que se debe tratar. Los sistemas de drenaje e impermeabilización son importantes porque son los que permiten que los lixiviados no contaminen los suelos y las aguas subterráneas (Robles Martínez, 2008).

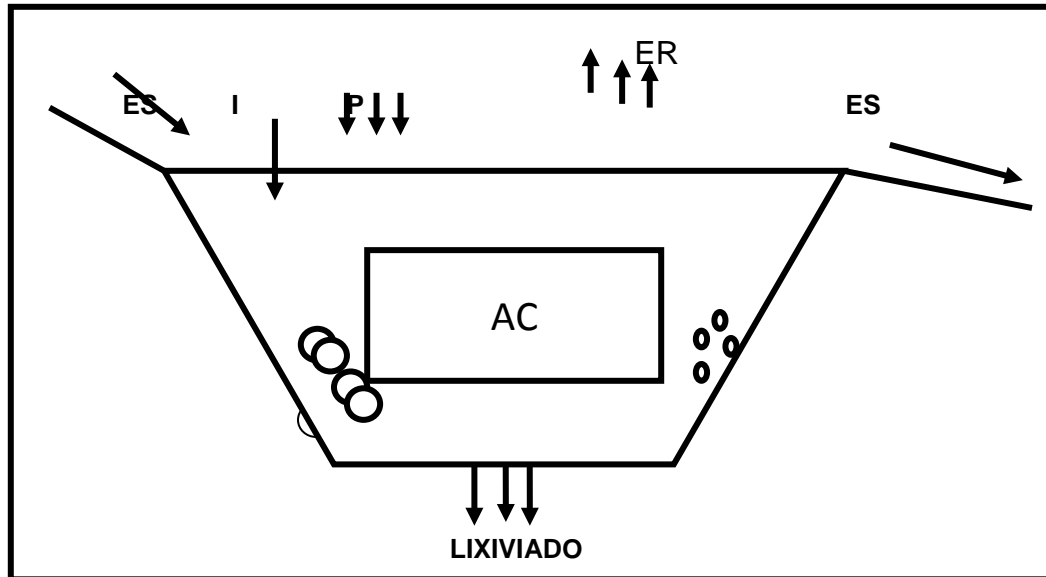
En algunos procesos la variación de caudal puede afectar el rendimiento, mientras que otros no, lo que genera la necesidad de estructuras de almacenamiento y ecualización de caudales donde esto puede afectar los costos del proceso (Collazos Peñaloza, 2008).

Los lixiviados mensuales totales debido a la descomposición, se debe agregar que, son generados por efectos de aguas lluvias que se precipitan sobre los rellenos sanitarios. La ejecución de obras de infraestructuras se ha diseñado para impedir la llegada de aguas escorrentías, mediante canales interceptores.

Es importante conocer las aéreas sobre las que tendrá en cuenta dicha precipitación. Estas aéreas se modifican a medida que crece el relleno sanitario, se hace necesario el diseño previo del mismo para conocer sus valores mes a mes.

Para obtener la generación de lixiviados en un relleno sanitario es necesario considerar un balance hídrico donde los requerimientos principales según Robles Martínez (2008), son:

El conocimiento de la precipitación pluvial en cada mes del año, así como la Evapotranspiración Potencial (EVP), tipo de material de cobertura superficial, pendientes y espesores (*Figura 12*).



**Figura 12. Balance hídrico en un relleno sanitario**

*Fuente: Elaboración propia*

- a) netamente superficial.- cuando ocurrida una precipitación, el agua se escurre o se infiltra.

$$P = I + ES$$

Donde:

$P$  = Precipitación

$I$  = Infiltración

$ES$  = escorrentía.

- *Precipitación (P)*: es la cantidad de lluvia que cae sobre el terreno del relleno, siendo (ES) la fracción de esta que ocurre superficialmente (escorrentía).

- *Infiltración (I)*: es la fracción de (P) que se infiltra entre las capas de los residuos dispuestos. La tasa de infiltración depende del tipo de superficie con que se cuente, material de cobertura final, cobertura vegetal, material de cobertura diaria e intermedia o residuos descubiertos.

Una vez que la precipitación se ha infiltrado y dependiendo de la capa de cobertura, el agua puede tener varios destinos: puede acumularse en dicha capa, puede evaporarse realmente o puede percolar hacia la basura subyacente.

- b) Interacción dentro de la capa del material de cobertura.- cuando se puede afirmar que generan lixiviados originados en la percolación, en cantidad igual al valor de la misma.

$$I = ER + PER + AC$$

*ER* = Evapotranspiración real

*PER* = Percolado

*AC* = Cantidad acumulada por efecto de la infiltración

- *Evapotranspiración (ER)*: corresponde a la parte del líquido que se evapora de la superficie y/o se transpira por acción de la cobertura vegetal.
- *Cantidad Acumulada por efecto de la infiltración (AC)*: es la deficiencia en el almacenamiento de humedad en el terreno, es la diferencia de la capacidad del campo y el volumen de humedad existente.
- *Percolación (PER)*: es el porcentaje de precipitación (P) que no se infiltra, ni escurre, y que tampoco es sometido a la evapotranspiración, la cual se convierte luego en lixiviado (L).

El lixiviado por percolación se determina sabiendo en qué meses del año el valor de PER es mayor a 0 y con el conocimiento del área total de la precipitación, se podría hallar estos volúmenes.

Es importante calcular percolados que alcanzan los lechos de basura y que con el transcurrir del tiempo llegarán a los filtros de lixiviados y seguirán los conductos de evacuación posterior a los sistemas de tratamiento o sencillamente irán a contaminar las aguas subterráneas o superficiales.

La geología y características específicas del suelo en el relleno, son algunos de los factores más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de determinar la generación de lixiviado donde la permeabilidad del suelo es la mayor o menor facilidad con que la percolación del agua ocurre a través de un suelo. El coeficiente de permeabilidad es un indicador de la mayor o menor dificultad con que un suelo resiste a la percolación del agua a través de sus poros. En otras palabras, es la velocidad con la que el agua atraviesa los diferentes tipos de suelo como se observa en la *Tabla 5*.

**Tabla 5. Precipitación pluvial en los rellenos sanitarios**

<b>Precipitación pluvial (mm)</b>	<b>Densidad de los residuos (ton/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Infiltración (%)</b>	<b>Capacidad de absorción de agua (m<sup>3</sup>/ton)</b>
339	1.01	20%	0.024
265	no reportado	35%	0.061
147	0.65	60%	0.102
216	0.79	55%	0.063
165	0.95	40%	0.041
269	0.67	55%	0.097

*Fuente:* (Collazos Peñaloza, 2008)



### **3.2.2. Características del lixiviado de un relleno sanitario**

Varios factores determinan las características de un lixiviado: su edad, la precipitación, las variaciones estacionales del clima, el tipo de residuo y su composición. Sin embargo el factor más relevante es la edad del relleno sanitario, asociada directamente a la composición del lixiviado.

Podemos observar en la *Tabla 6* que los rellenos se pueden diferenciar en: jóvenes y maduros. Los lixiviados provenientes de rellenos jóvenes poseen una alta concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) producto de la fermentación anaerobia que se lleva a cabo dentro del relleno, llegando a ser cerca del 95% de la materia orgánica presente. Los AGV corresponden a compuestos de fácil biodegradación; por lo tanto, considerando que la medida de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mide la materia orgánica total y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) mide sólo materia biodegradable, para los lixiviados generados en rellenos jóvenes la razón DQO/DBO puede encontrarse en alrededor de 0,5. En rellenos más maduros ocurre el proceso metanogénesis, última reacción de proceso completo de digestión anaerobia, donde gran parte de los AGV son transformados en biogás (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>). En esta etapa los lixiviados son formados principalmente por material orgánico de más difícil degradación por tanto la relación DQO/DBO baja considerablemente a valores menores que 0.10 (Winkler, 2000).

Estas características son importantes en cuanto nos indican qué es lo que toca removerle a los lixiviados durante su tratamiento; sin embargo, desde el punto de vista de la selección de la tecnología, existen otras características no contaminantes que pueden afectar el funcionamiento de los procesos de tratamiento (Caicedo Messa, 2006).

**Tabla 6. Características físico-químicas típicas de un lixiviado en las etapas de un relleno.**

<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS TÍPICAS DE UN LIXIVIADO</b>			
<b>EDAD DEL RELLENO</b>	<b>NUEVO (&lt; 2 AÑOS)</b>	<b>NUEVO (&lt; 2 AÑOS)</b>	<b>&gt; 10 AÑOS</b>
<b>CONSTITUYENTES</b>	<b>RANGO</b>	<b>VALOR TÍPICO</b>	<b>RANGO TÍPICO</b>
DQO	3000 - 60000	18000	100 - 500
DBO5	2000 - 30000	10000	100 - 200
COT	1500 - 20000	6000	80 - 160
SST	200 - 2500	500	100 - 400
Nitrógeno Total	20 - 1500	400	100 - 200
Fosforo Total	5 - 100	30	5 - 10
Alcalinidad CaCO2	1000 - 10000	3000	200 - 1000
Sales Solubles	200 - 4000	800	100 - 500
Hierro	50 - 1200	60	20 - 200
Plomo	1 - 10	2	0.01 - 0.5
Zinc	25 - 250	50	0.1 - 1
pH	5 - 8	6	6.6 - 7.5

*Fuente: (Caicedo Messa, 2006)*

La Tabla 7 nos indica la comparación de las características típicas de un lixiviado joven y uno viejo donde contienen casi todas características contaminantes principales; es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos.

**Tabla 7. Comparación de las características típicas de un lixiviado joven y un lixiviado viejo**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>LIXIVIADO JOVEN</b>	<b>LIXIVIADO VIEJO</b>
DBO	Muy alto	Bajo
DQO	Muy alto	Alto
Amoniaco	Muy alto	Alto
Fosforo	Usualmente Deficiente	Suficiente
pH	Muy bajo	Bajo
Detergentes	Muy alto	Bajos
Sales disueltas	Muy Altas	Bajas (relativamente)
Agente Incrustantes (Fe, Ca, Mg)	Muy Altos	Bajos
Metales Pesados	Muy Altos	Bajos

*Fuente: (Giraldo, 1997)*

De las Tablas 6 y 7 se observa que el tipo de tratamiento de un lixiviado joven y uno viejo es muy diferente debido a:

- Concentraciones de todos los parámetros mucho mayores en un lixiviado joven que en un lixiviado viejo.
- Las concentraciones de sales disueltas y metales pesados son mucho mayores en un lixiviado joven, generando problemas de toxicidad en el caso de que se quieran utilizar procesos biológicos para la remoción de la DBO.
- Por otra parte, las concentraciones de agentes incrustantes como el hierro, el calcio y el magnesio, generan grandes problemas prácticos pues taponan la mayoría de los conductos, tuberías, accesorios, válvulas, membranas, tanques etc. en donde el lixiviado entra en contacto con el sistema de conducción y de tratamiento. El atascamiento de los sistemas de drenaje, de conducción y de tratamiento de los

lixiviados es siempre un problema práctico de gran significancia en los rellenos sanitarios.

- El bajo pH a su vez puede interferir con el funcionamiento de numerosas tecnologías como, la volatilización del amoníaco, para la cual se requieren pH básicos, o con algunos procesos biológicos como la nitrificación, o químicos como la oxidación del hierro.

Así como la remoción de DBO se ve afectada por la toxicidad que generan los metales, pero a su vez, la remoción de metales, incluyendo aquellos incrustantes como el hierro, se ve interferida por la presencia de la DBO que sirve como agente acomplejante que mantienen los metales en solución dificultando y limitando severamente su remoción (Winkler, 2000).

Según Tchobanoglous et als (1997), en la *Tabla 8* se reportan datos de las características físico-químicas del lixiviado, en donde indica que los rangos de valores de concentración son un tanto extremo. Por esta razón, no se pueden dar valores promedio para el lixiviado. Los valores típicos reportados en esta tabla sirven como guía básica.

Las características de los lixiviados por lo general pueden ser representados por los parámetros básicos que son: DQO, DBO, la relación DBO / DQO, pH, sólidos suspendidos (SS), nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N), Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN), y metales pesados.

**Tabla 8. Características físico-químicas típicas de un lixiviado.**

CONSTITUYENTE	RANGO (mg/l)	TÍPICO (mg/l)
DBO <sub>5</sub> (demanda bioquímica de oxígeno, 5)	2.00 - 3.000	1.000

COT (Carbón orgánico total)	1.500 – 20.000	6.00
DQO (Demanda química de oxígeno)	3.000 – 45.000	18.000
Sólidos suspendidos totales	200 – 1.000	500
Nitrógeno orgánico	100 - 600	200
Nitrógeno amoniacal	10 - 800	200
Nitrato	5 - 40	25
Fósforo total	1 - 70	30
Orto - Fósforo	1 - 50	20
Alcalinidad como Ca CO <sub>3</sub>	1.000 – 10.000	3.000
pH	5.3 – 8.5	6
Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	300 – 10.000	3.500
Calcio	200 – 3.000	1.000
Magnesio	50 – 1.500	250
Potasio	200 – 2.000	300
Sodio	200 – 2.000	500
Cloruro	100 – 3.000	500
Sulfato	100 – 1.500	300
Hierro Total	50 - 600	60

*Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Eliassen, 1977)*

En la Tabla 9 podemos observar diferentes rellenos sanitarios del mundo con una amplia variación en las características físico-químicas, estos datos muestran que la edad del relleno y por lo tanto, el grado de estabilización de residuos sólidos, tiene un efecto significativo en las características del efluente. Los valores de DQO varían de 70900 mg.L<sup>-1</sup> a 500 mg.L<sup>-1</sup>, el primer valor obtenido de una muestra de lixiviado de Tesalónica (Grecia) y con una muestra que tiene más de 10 años de edad el vertedero cerca de Marsella (Francia). Con excepción de unos pocos, el pH de los lixiviados se encuentra en 5.8 a 8.5, lo que es debido a la actividad biológica dentro de la punta. También

es importante mencionar que la mayoría de TKN (nitrógeno amoniacal) puede variar desde 0.2 hasta 13000 mg.L<sup>-1</sup>. La relación de los DBO/DQO está entre 0.70 a 0.04 con lo que concluimos que va disminuyendo con el envejecimiento de los lixiviados. Esto es debido a la liberación de las grandes moléculas orgánicas recalcitrantes de los residuos sólidos. En consecuencia, los lixiviados de vertedero viejo se caracteriza por su baja proporción de DBO / DQO y alta NH<sub>3</sub>-N.

**Tabla 9. Características físico-químicas del lixiviado en el mundo (todos los valores en excepto pH y DBO/DQO son en mg.L<sup>-1</sup>).**

EDAD	SITIO DEL RELLENO	DQO	DBO	DBO/DQO	PH	TKN	NH <sub>3</sub> -N
Joven	Canada	13800	9660	0.70	5.80	212	42
Joven	China, Hong Kong	15700	4200	0.27	7.7	-	2260
Joven	China, Mainland	1900-3180	3700-8890	0.36-0.51	7.4-8.5	-	630-1800
Joven	Greece	70900	26800	0.38	6.20	3400	3100
Joven	Italia	19900	4000	0.20	8	-	3917
Joven	South Korea	24400	10800	0.44	7.30	-	1766
Joven	Turkey	10750-18420	6380-9660	0.52-0.59	7.7-8.2	-	1946-2006
Medio	Canada	310-9190	-	-	6.9-9.0	-	-
Medio	China, Hong Kong	7439	1436	0.19	8.22	-	-
Medio	Germany	3180	1060	0.33	-	1135	884
Medio	Greece	5350	1050	0.20	7.9	1100	940
Medio	Italia	5050	1270	0.25	8.38	1670	1330
Medio	Paland	1180	331	0.28	8	-	743
Medio	Taiwan	6500	500	0.08	8.1	-	5500
Medio	Turkey	9500	-	-	8.15	1450	1270
Viejo	Brasil	3460	150	0.04	8.2	-	800
Viejo	Estonia	2170	800	0.37	11.5	-	-
Viejo	Finland	556	62	0.11	-	192	159
Viejo	Francia	500	7.1	0.01	7.5	540	430
Viejo	Malaysia	1533-2580	48-105	0.03-0.04	7.5-9.4	-	-
Viejo	South Korea	1409	62	0.04	8.57	141	1522
Viejo	Turkey	10000	-	-	8.6	1680	1590

*Fuente:* (Renoua, Givaudana, Poulaina, Dirassouyanb, & Moulinc, 2004)

Los metales pesados en el lixiviado varían según la edad del relleno como observamos en la tabla 10.

**Tabla 10. Características de los metales pesados en el lixiviado (todos los valores son en mg.L<sup>-1</sup>).**

Edad	Sitio del relleno	Fe	Mn	Ba	Cu	Al	Si
Nuevo	Italia	2.7	0.04	-	-	-	-
Medio	Canadá	1.28-4.90	0.028-1.541	0.006-0.164	-	<0.02-0.92	3.72-10.48
Medio	Hong Kong	3.811	0.182	-	0.12	-	-
Medio	South Korea	76	16.4	-	0.78	-	-
Medio	España	7.45	0.17	-	0.26	-	-
Viejo	Brasil	5.5	0.2	-	0.08	<1	-
Viejo	Francia	26	0.13	0.15	0.005-0.04	2	<5
Viejo	Malaysia	4.1-19.5	15.5	-	-	-	-
Viejo	South Korea	-	0.298	-	0.031	-	-

*Fuente:* (Renoua, Givaudana, Poulaina, Dirassouyanb, & Moulinc, 2004)

Aunque la composición de los lixiviados puede variar ampliamente entre las sucesivas etapas aeróbica, acetogénica, metanogénicas, la evolución de los residuos ha definido tres tipos de lixiviados, según la edad del relleno (*Tabla 11*). La relación existente entre la edad del lixiviado y la composición orgánica de la materia puede proporcionar un criterio útil para elegir un proceso de tratamiento adecuado.

**Tabla 11. Variación de las características del lixiviado con respecto al tiempo (todos los valores son en mg.L<sup>-1</sup>)**

	Nuevo	Intermedio	Viejo
<b>Edad (años)</b>	<5	5-10	>10
<b>pH</b>	6.5	6.05-7.05	>7.5
<b>DQO</b>	>10.000	4-10000	>4000
<b>DBO5/DQO</b>	>0.3	0.1-0.3	<0.1
<b>Compuestos Orgánicos</b>	80% AGV	5-30% AGV+húmicos y ácidos fúlvicos	Ácidos húmicos y fúlvicos
<b>Metales pesados</b>	Baja-media		Bajo
<b>Biodegradabilidad</b>	Importante	Medio	Bajo

*Fuente:* (Renoua, Givaudana, Poulaina, Dirassouyanb, & Moulinc, 2004)

### **3.3. Procesos usados para el tratamiento de lixiviados.**

Como se puede observar los lixiviados presentan numerosos problemas que deben tenerse en cuenta al momento de seleccionar la tecnología de tratamiento.

Las alternativas de procesos utilizados para el tratamiento de lixiviados se pueden categorizar de acuerdo a varias características como los niveles de tratamiento que se logren con cada una de ellas, o por el tipo de contaminación que puedan remover. Debe recordarse que los lixiviados contienen todos los mayores grupos de contaminación como son; la contaminación por patógenos, por materia orgánica, la contaminación por nutrientes, y por sustancias tóxicas.

Se tienen las principales tecnologías que son:

#### **3.3.1. Procesos Biológicos**

Los procesos biológicos han demostrado ser muy eficaz en la eliminación de la materia orgánica y nitrogenada de lixiviados maduros, donde la relación DBO/DQO indica la biodegradabilidad de un flujo que es la característica de un efluente como fuente de sustrato para los microorganismos. Desde el punto de vista de tratamientos de aguas residuales los compuestos orgánicos presentes en el agua residual pueden ser biodegradables o no biodegradables, así cuando la relación de DBO/DQO es inferior a 0.2, el flujo es poco biodegradable; entre 0.2 y 0.4 es biodegradable y con valores superiores a 0.4 es indicativo de flujos altamente biodegradables. Con el tiempo, la mayor presencia de compuestos refractarios tiende a limitar la eficacia del proceso.

##### **3.3.1.1. Procesos aerobios**

El proceso aerobio es un proceso de respiración de oxígeno en el cual el oxígeno libre es el único aceptador final de electrones; el oxígeno es reducido y



el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica o inorgánica. Todos los organismos que usan oxígeno libre como aceptador de electrones son aerobios. Usualmente, las bacterias son los organismos más importantes en el tratamiento aerobio porque son excelentes oxidadores de materia orgánica y crecen bien en aguas residuales, siendo capaces de formar una capa floculenta gelatinosa de muy buenas características para la remoción de la materia orgánica. Tanto en los procesos de lodos activados como en filtros percoladores son comunes (Romero Rojas, 2008).

Existe gran variedad de tipos de sistemas, desde las tradicionales lagunas aireadas, hasta sofisticados sistemas que acoplan reactores biológicos con procesos de ultrafiltración con membranas.

Se utilizan cuando se requiere obtener una baja concentración de DBO en los efluentes ya que usualmente las concentraciones de DBO en los lixiviados son muy altas, es por eso relativamente fácil tener remociones porcentuales superiores al 90% en este parámetro de tratamientos; sin embargo, la DBO remanente puede ser todavía alta. Los costos de inversión, operación y mantenimiento son significativamente superiores a los de los procesos anaerobios cuando los lixiviados son concentrados, como es el caso de un lixiviado joven, se recomienda mejores relaciones beneficio / costo cuando se utilizan para tratar lixiviados con concentraciones medias o bajas de DBO. Dependiendo de las exigencias del vertimiento, se usan preferencialmente como post tratamiento a los sistemas anaerobios, o para lixiviados viejos con bajos niveles de DBO.

Los problemas presentados en este tipo de procesos son la generación de espumas, la precipitación de hierro, y en el caso de los lodos activados, problemas para aceptar altas variaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas; esto último puede implicar que los sistemas requieran tanques de equalización

de caudales como parte del tratamiento y dependiendo de la forma de operación del proceso, se tiene una alta generación de lodos residuales, que es necesario procesar aumentando los costos de inversión y de operación y mantenimiento (Giraldo, 1997).

En la Tabla 12 se menciona las ventajas y desventajas de este tipo de proceso.

**Tabla 12. Ventajas y desventajas del proceso aerobio**

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausencia de olores</li> <li>• Mineralización de todos los compuestos biodegradables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tasa alta de síntesis celular y por consiguiente, alta producción de lodos.</li> <li>• Requiere mucha energía eléctrica para oxidación y mezcla.</li> <li>• Gran proporción de células en los lodos que hace, en algunos casos, necesaria su digestión, antes de secarlos y disponerlos.</li> </ul>

*Fuente: (Romero Rojas, 2008)*

### 3.3.1.2. Proceso anaerobio

El proceso anaerobio o fermentación lo definió Pasteur como la vida sin aire. Es la descomposición u oxidación de compuestos orgánico, en ausencia de oxígeno libre, para obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios. El proceso anaerobio es menos eficiente en producción de energía que el aerobio, puesto que la mayoría de la energía liberada en el catabolismo (oxidación o descomposición) anaerobio proveniente de la sustancia descompuesta aún permanece en los productos finales orgánicos reducidos como el metano, generándose una cantidad de biomasa mucho menor que la producida en el proceso aerobio (Romero Rojas, 2008).

Las condiciones óptimas para un proceso anaerobio son:

- Nutrientes suficientes.
- pH entre 6.5 y 7.6, se deben prevenir los pH menores a 6.2, valor en que no trabajan las bacterias metanogénicas.
- Temperatura en el intervalo mesofílico 30-38°C ó en el intervalo termofílico 50-60°C.
- Ausencia de Oxígeno.
- Ausencia de sustancias tóxicas, tales como metales pesados, sulfuros.

Un sistema modular, que permita expandirse y contraerse fácilmente puede representar ventajas claras en cuanto al flujo de capital y a costos de operación y mantenimiento de los sistemas que se instalen.

Como en todo tipo de proceso tiene ventajas y desventajas que se mencionan en la *Tabla 13*.

**Tabla 13. Ventajas y desventajas del proceso anaerobio.**

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tasa baja de síntesis celular y por consiguiente, poca producción de lodos.</li> <li>• El lodo producido es razonablemente estable y puede secarse y disponerse por métodos convencionales.</li> <li>• No requiere oxígeno. Por tanto, usa poca energía eléctrica y es especialmente adaptable a aguas residuales de alta concentración orgánica.</li> <li>• Produce metano, el cual puede ser útil como energético.</li> <li>• Tiene requerimientos nutricionales bajos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para obtener grados altos de tratamiento requiere temperaturas altas.</li> <li>• El medio es corrosivo</li> <li>• Exige un intervalo de operación de pH bastante restringido</li> <li>• Requiere concentraciones altas de alcalinidad</li> <li>• Es sensible a la contaminación con oxígeno</li> <li>• Puede presentar olores desagradables por H<sub>2</sub>S, ácidos grasos y amidas</li> </ul>

*Fuente: (Romero Rojas, 2008)*

### **3.3.2. Evaporación**

La utilización de la evaporación es una aplicación nueva como sistema de tratamiento de lixiviados, donde se utiliza la energía del biogás que se genera en el relleno sanitario para evaporar el lixiviado por calentamiento. Existen tecnologías que permiten lograr el control total de emisiones de lixiviados del relleno sanitario, quedando un lodo que se dispone nuevamente en el relleno.

La experiencia y los cálculos de producciones de gas y lixiviados en los rellenos sanitarios indican que se tiene gas en exceso para suplir las necesidades energéticas de evaporación del lixiviado. Dependiendo del tipo de lixiviado en algunos casos existe la necesidad de hacer un post-quemado de la mezcla gas-vapor de agua que sale del evaporador para lograr la destrucción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Algunas tecnologías utilizan de manera directa la energía que se genera al quemar el gas con el objetivo central de evaporar el lixiviado, lo que se denomina vaporización del gas, mientras que otras tecnologías pueden utilizar el calor residual que generan motores de combustión o turbinas que utilizan el biogás para generar potencia mecánica, que a su vez se puede usar para la generación eléctrica. De esta manera, se están logrando llevar a cabo no solamente el aprovechamiento del gas para la conversión de energía eléctrica, sino solucionando los dos problemas principales en el tratamiento de los lixiviados que tienen los rellenos sanitarios: emisiones de gases y de lixiviados (Giraldo, 1997).

Otro método de evaporación es rociar el líquido en este caso el lixiviado sobre una superficie para que posteriormente se evapore, solo se debe asperjar hasta que el suelo se sature de lixiviado; es decir, que no debe producir escorrentía, ni penetrar en las capas inferiores del suelo (material de cobertura impermeable o capas de geomembranas); por lo tanto, se cambia de sitio hacia otra área que este seca y así sucesivamente. La evaporación se realiza todos los días de la

semana, de día y de noche, siempre que sean días soleados y calurosos, durante los días de lluvia no se debe rociar (*Figura 13*).

La aspersión y la evaporación tienen relación directa: se asperja para saturar el suelo y después se evapora para secarlo, es así que las ciudades con una relación de Evaporación/ precipitación mayor a 1,5 se puede aprovechar casi todo el año la evapotranspiración, cuando la relación es menor a 1,5 se puede usar una alternativa combinada con otro método.

Este método para el manejo de los lixiviados es usado en Inglaterra; en México, en relleno sanitario de Tlalnepantla; en el relleno sanitario "Las Iguanas" en Guayaquil; en el relleno sanitario Parque ambiental de Villa Karima, en Calarcá – Quindío (Collazos Peñaloza, 2008).



**Figura 13. Manejo y eliminación de lixiviados mediante tratamiento de evaporación.**

*Fuente: (Consortio-ILM "Las Iguanas", 2012)*

### **3.3.3. Recirculación de los lixiviados**

Método ampliamente utilizando es la recirculación, que consiste en sacar el lixiviado y volver a introducirlo dentro de la basura, para utilizarla como un gran filtro.

Este método parece que está dando resultados, pero es muy peligroso por que fácilmente se aumenta el nivel piezométrico, causando derrumbes, como lo sucedido en el relleno sanitario Doña Juana en el mes de septiembre de 1997.

El método puede servir con un buen estudio de estabilidad de taludes y con la combinación de otros métodos como sería la evaporación, este tipo de métodos necesita mucho cuidado en su operación

El lixiviado como efluente del relleno sanitario se capta en un tanque de almacenamiento, se envía con bombas a un tanque superior y de allí se introduce por tubería nuevamente al relleno sanitario, después de varias recirculaciones y el cumplimiento con las normas de aguas efluentes, se entrega a una fuente receptora (Collazos Peñaloza, 2008).

La recirculación de lixiviados se ha utilizado ampliamente en la última década, ya que era una de las opciones más económicas y además aumenta el contenido de humedad en un sistema de reactor controlado. Se observa la disminución significativa en la producción de metano y DQO cuando el volumen de lixiviado recirculado era 30% del volumen del lecho de residuos inicial. Además en la tabla 14 se observa que Rodríguez et al. (2004) reportaron una reducción de DQO 63-70% en una planta piloto anaerobio con recirculación.

La recirculación de lixiviado además de mejorar la calidad de los lixiviado también acorta el tiempo requerido para la estabilización. Aunque existen efectos positivos sobre la degradación de los residuos sólidos, los datos disponibles en la *Tabla 14* son limitados en relación con el impacto del tipo de recirculación en la eficacia del tratamiento con digestores anaeróbicos controlados. Las altas

tasas de recirculación pueden afectar negativamente a la degradación anaerobia de los residuos sólidos. Por ejemplo, Ledakowicz y Kaczorek (2004), observaron que la recirculación de lixiviados puede conducir a la inhibición de la producción de metano, ya que puede causar altas concentraciones de ácidos orgánicos (pH <5), que son tóxicos para los metanogénos. Por otra parte, si el volumen de los lixiviados recirculado es muy alto, pueden ocurrir problemas tales como la saturación, encharcamiento y condiciones ácidas (Renoua, Givaudana, Poulaina, Dirassouyanb, & Moulinc, 2004).

**Tabla 14. Rendimiento de procesos de Recirculación de lixiviados**

Características de la Alimentación			Condiciones de operación			Rendimiento
DQO (g.L <sup>-1</sup> )	pH	De	Volumen del reactor (L)	T °C	Recirculación (L.d <sup>-1</sup> )	Remoción %
80000	5.5-6.5	Planta piloto	707	36	-	98 DQO
47000-52000	-	Planta piloto	70	35	9-21	-
716-1765	7.58-7.60	Planta piloto	-	-	40	63-70 DQO
2560-5108	8.00-8.43	Relleno	-	-	40	

*Fuente:* (Renoua, Givaudana, Poulaina, Dirassouyanb, & Moulinc, 2004)

### **3.3.4. Sistemas de Membranas**

#### **3.3.4.1. Biorreactores con membrana MBR**

Los biorreactores con membrana se utilizan de la misma manera que los sistemas biológicos de tratamiento, siendo la principal diferencia la sustitución del sedimentador como sistema de separación sólido-líquido por un sistema de micro o ultrafiltración. Esto puede tener ventajas en términos de la disminución del volumen del tanque del reactor biológico; sin embargo, la complicaciones adicionales en la operación de los sistemas ya que los módulos de membranas son más complicados de operar y mantener que un sedimentador. Igualmente se logran aumentos significativos en la cantidad de biomasa que se tiene dentro

de los reactores, pero al mismo tiempo se puede perder eficiencia en la transferencia de masa en la aireación, de tal manera que se aumentan los costos de energía por este sentido. Análisis recientes indican que se gana en costos por la reducción del tamaño de los tanques de aireación, y se pierde por el aumento en costos asociados a los equipos de aireación, al igual que el aumento de costos de operación (Giraldo, 1997)

#### 3.3.4.2. Ósmosis Inversa

En el proceso de ósmosis inversa se reportan rendimientos para la remoción de la mayoría de los contaminantes con mayor eficiencia para lixiviados con concentraciones de DBO relativamente bajas, menores a 1000 mg/l; es decir, lixiviados viejos, o lixiviados a los cuales se les ha realizado un pre-tratamiento previo. Se habla de concentraciones relativamente bajas, porque dentro de los rangos de DBO de los lixiviados de rellenos sanitarios de países en desarrollo se tienen concentraciones en los lixiviados jóvenes del orden de las decenas de miles de miligramos por litro; es decir, entre 10 y 40 veces más concentrados. Se debe entonces tener cuidado en la aplicación de la tecnología de manera directa a lixiviados jóvenes, especialmente de aquellos que se encuentran en los países en desarrollo. Otra ventaja que se reporta con frecuencia en el caso de la ósmosis inversa son los bajos consumos energéticos en comparación con otras tecnologías como la oxidación biológica o la evaporación.

Se han reportado problemas de colmatación (acumulación de sedimentos) asociados a la precipitación del calcio y el hierro en las membranas, obligando a la incorporación de sistemas de pre-tratamiento que minimicen estos efectos. Esto se ha logrado de diversas maneras, desde la aplicación de sustancias químicas que modifiquen las condiciones bajo las cuales ocurre la precipitación, hasta la incorporación de nuevos procesos tales como la ósmosis directa o la precipitación-cristalización. En la terminología de las membranas se denomina el permeado, lo que pasa la membrana; y el concentrado, lo que queda



retenido. La tecnología es intensiva en cuanto a la operación y mantenimiento necesario, por lo que es necesario hacer lavados, limpiezas y reemplazos de las membranas, consideración que debe tenerse en cuenta en el momento de seleccionar la tecnología (Renoua, Givaudana, Poulaina, Dirassouyanb, & Moulinc, 2004)

### **3.3.5. Sistemas Naturales**

Los sistemas naturales, lagunas y humedales artificiales, también se han propuesto como alternativas para el tratamiento de lixiviados. Por la simplicidad en su operación, y la posibilidad de lograr diferentes niveles de tratamiento, desde un pre tratamiento, hasta un tratamiento terciario en caso de necesitarse. La combinación de las lagunas y los humedales puede manejar adecuadamente muchos de los problemas que en otras tecnologías aparecen como son la acumulación de precipitados, la formación de espumas, la toxicidad a los microorganismos, y las variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas. Esto se logra con tiempos de retención hidráulica muy altos y volúmenes de procesos igualmente grandes, que permiten acomodar variaciones en caudal, acumulaciones de precipitados, y baja producción de gases y por lo tanto, de espumas.

La principal desventaja es la cantidad de terreno que se requiere para localizar los procesos. Sin embargo, por la naturaleza misma de los diseños de los rellenos sanitarios, en donde existe áreas de amortiguamiento visual, de ruido, y olores; estas áreas que usualmente están localizadas en los alrededores del relleno, podrían utilizarse como parte de los sistemas naturales de tratamiento; en especial en el caso de los humedales (Collazos Peñaloza, 2008)

Existe amplias variaciones en el desempeño del sistema de lagunas como se muestra en la *Tabla 15* donde se ha utilizado lagunas anaeróbicas-aeróbicas y humedales artificiales para el tratamiento biológico de lixiviados en rellenos

sanitarios obteniendo que N, P y Fe estaban por encima de 70% para el lixiviado diluido.

La viabilidad de lagunas para el tratamiento de compuestos fenólicos, así como de materia orgánica donde se logró reducción del 55-64% con respecto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y 80-88% de fenol. En la *Tabla 15* se indica que la dependencia de la temperatura en las lagunas es una limitación importante, ya que afecta principalmente a la actividad microbiana.

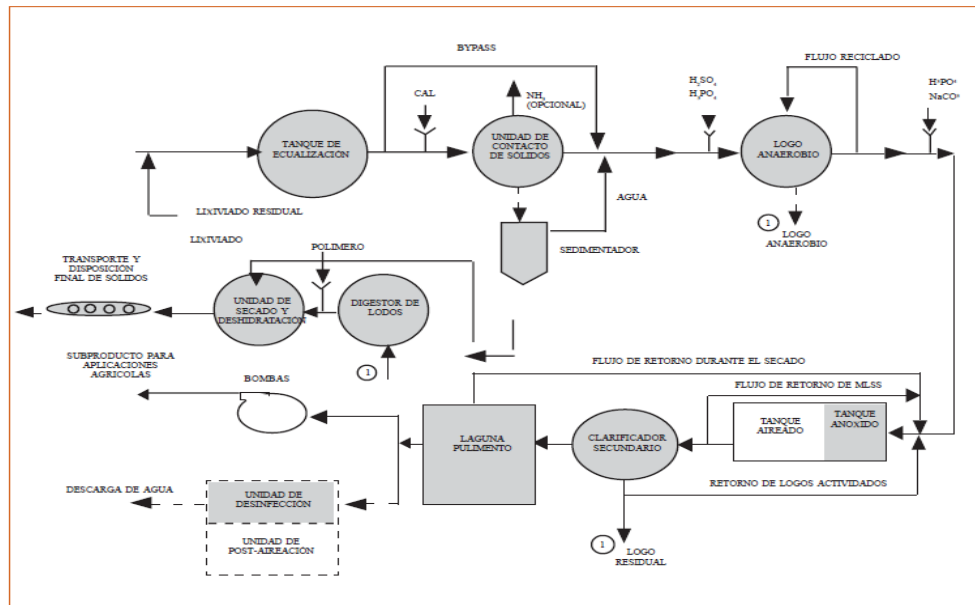
**Tabla 15. Rendimiento de lagunas en rellenos sanitarios**

Características de Alimentación			Condiciones de Operación				Rendimiento
DQO (g.L <sup>-1</sup> )	DBO/DQ		Tipo de laguna	Volumen	T °C	THR (d)	Remoción (%)
	O	pH					
5518	0.7	5.8	Laguna aireadas	1000 m <sup>3</sup>	-	>10	97 DQO
-	-	-	(1)Lagunas anaerobia	(1)400 m <sup>3</sup>	-	40	65-95 DQO
			(2)Laguna aireadas	(2)4000 m <sup>3</sup>			
			(3)Construcción de humedales	(3)400 m <sup>2</sup>			
			(4) Superficie de agua libre	(4)2000 m <sup>2</sup>			
1182	0.26	-	(1)Laguna Primaria	(1)113400 m <sup>3</sup>	-	20	89 DQO
			(2)Humedales aireados	(2)4528 m <sup>3</sup>			
			(3) Laguna final				
765-3090	0.43-0.53	8.7-12.5	(1)Lagunas aireadas	(1)17 L	19	(1) 16-22	55-64 DQO
			(2)Lagunas de pulido	(2)9.7 L		(2) 9.1-12.6	
5050	0.25	8.38	Laguna sin gas	9960 m <sup>2</sup>	22.8	32	40 DQO

*Fuente:* (Renoua, Givaudana, Poulaina, Dirassouyanb, & Moulinc, 2004)

### **3.3.6. Sistema PTAR**

Un tren de tratamiento "clásico", como se observa en la *Figura 14*, inicia con un tanque de ecualización de caudales y calidades para minimizar los efectos de variaciones de cargas hidráulicas y orgánicas en los procesos posteriores, luego un sistema físico-químico de remoción de constituyentes precipitables, que incluye parte de los metales pesados, utilizando una elevación del pH para lograr su precipitación y su remoción por sedimentación. Posteriormente se baja nuevamente el pH para ajustarlo al tratamiento biológico utilizando ácido fosfórico-que a su vez suministra el fósforo que le hace falta al sistema biológico. El sistema biológico incluye una primera etapa anaerobia que tiene altas eficiencias a bajos costos, relativos, y un pulimento posterior en una segunda etapa aerobia que permite bajas concentraciones en el efluente en términos de DBO, e inclusive la remoción de amoníaco a través de la nitrificación, desnitrificación biológica. En algunos casos la remoción del amoníaco se realiza en las etapas del pre tratamiento aprovechando el hecho de que al subir el pH para la precipitación igualmente se puede volatilizar el amoníaco. Esta decisión depende de la acidez del sistema y por lo tanto de los costos relativos de las sustancias químicas para subir y bajar el pH nuevamente. Finalmente para la remoción final de patógenos se tiene un sistema de desinfección para los cuales existen numerosas tecnologías alternativas (Giraldo, 1997).



**Figura 14. Tren de tratamiento clásico para aguas residuales.**

*Fuente: (Giraldo, 1997)*

### **3.3.7. Comparación de los diferentes procesos de tratamiento**

Esta apreciación quizás ayuda a explicar la gran cantidad de tecnologías y de investigación que se ha realizado, y aún se realiza, alrededor del tema. En general puede decirse que todavía hay mucho campo para la innovación. Tal vez la solución final y racional consista en no producir los lixiviados, o al menos en producir lixiviados de características mucho menos contaminantes. Sin embargo esta solución se podrá dar cuando se mire de una manera global el flujo de materiales en la sociedad y se concienticen los costos ambientales en todo el ciclo de los materiales, desde su producción, transformación, distribución, uso y descarte.

En la *Tabla 16* se observa un resumen de las principales características y consideraciones que se deben tener en cuenta en la comparación de las tecnologías según el proceso de tratamiento del lixiviado que se utilice. En general se puede observar que los problemas de acumulación de precipitados,

emisiones de COV's, toxicidad a los microorganismos, formación de espumas afectan de manera similar a los procesos biológicos intensivos. Esto ha hecho que las aplicaciones sean usualmente sistemas híbridos en los cuales se logre unos pre-tratamientos iniciales en donde se acondicione el lixiviado para minimizar los efectos mencionados anteriormente.

**Tabla 16. Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados (Manejo de características problemáticas de los lixiviados).**

PROBLEMA CON	TECNOLOGÍA						TRATAMIENTO EN PTA
	AERO BIO	ANAERO BIO	EVAPORACIÓN	RECIRCULACIÓN	MEMBRANAS	SISTEMAS NATURALES	
Formación de Precipitados	++	+++	+	++	+++	+	No
Toxicidad a los microorganismos	++	++	No	No	No (1)	+	Potencial
Formación de espumas	+++	+	++	+(1)	Variable (2)	No	Baja
Emisión de COV	+++	+	++	+	Variable (2)	+	Baja
Sensibilidad a variaciones de caudal	++	++	+	+	+	No	No
Producción y manejo de lodos	+++	+	+	No	+		No
Requerimiento de área	Baja	Baja	Muy baja	Baja	Baja	Alta	No

(1) Pueden formarse en los tanques de almacenamiento

(2) Si los sistemas son aerobios, la problemática puede ser alta

(+) Una cruz significa como afecta negativamente la característica al proceso en cuestión.

Entre más cruces más negativamente lo afecta

*Fuente: (Giraldo, 1997)*

De hecho se puede observar en las *Tabla 17 y 18* tecnologías como:

La evaporación que puede lograr reducciones similares o superiores a los sistemas combinados, teniendo menos problemas operacionales, menores emisiones de lodos, y de acuerdo a comparaciones realizadas en países desarrollados, aparentemente mucho menores costos de tratamiento.

La recirculación de los lixiviados, comparten muchas de las ventajas de las otras tecnologías pero sin embargo, como ya se mencionó, existen serios cuestionamientos sobre sus efectos sobre la estabilidad geotécnica del relleno, que limita su aplicación.

Los sistemas naturales por su parte, pueden tener igualmente excelentes remociones. Esto se logra básicamente usando altos tiempos de retención hidráulica en los sistemas, suficientes volúmenes de almacenamiento de precipitados y lodos, bajas tasas de reacción, y mayores áreas que las tecnologías anteriores. Poseen la sencillez y simplicidad tecnológica.

Finalmente los sistemas de membranas aparecen como una alternativa viable, con altos rendimientos operacionales en la limpieza del lixiviado, pero comparten en gran medida la complejidad tecnológica que se le atribuye a los sistemas clásicos, requieren de pre-tratamientos similares a los presentados.

**Tabla 17. Comparación entre complejidad de tecnologías para el tratamiento de lixiviados (Complejidad tecnológica).**

COMPLEJIDAD TECNOLÓGICA							
PROBLEMA CON	AEROBIO	ANAEROBIO	EVAPORACIÓN	RECIRCULACIÓN	MEMBRANAS	SISTEMAS NATURALES	TRATAMIENTO EN PTA
Necesidad de insumos químicos	+++ (1)	+++ (1)	++ (2)	-	+++ (1)	-	-

PROBLEMA CON	AEROBIO	ANAEROBIO	EVAPORACIÓN	RECIRCULACIÓN	MEMBRANAS	SISTEMAS NATURALES	TRATAMIENTO EN PTA
Necesidad de insumos operacionales (v. gr. Membranas)	++	+	+	+	+++	-	-
Necesidad de suministro de partes	++	-	+	+	+++	-	+
Suministro de energía eléctrica	++	+ (4)	- (5)	+	+++	+ (3)	+
Complejidad operacional	++	+	++	+	+++	-	-

(1) Requiere un extenso tratamiento.

(2) Puede requerir pre tratamiento, algunos sistemas usan sustancias para control de pH, espumas.

(3) Puede requerir si hay necesidad de bombear el lixiviado. Usualmente no requiere.

(4) Puede requerir en el sistema de pre tratamiento.

(5) Puede llegar a ser autosuficiente. Algunas tecnologías así están diseñadas.

*Fuente: (Giraldo, 1997)*

**Tabla 18. Comparación de rendimientos para el tratamiento de lixiviados (Rendimiento de remoción)**

RENDIMIENTOS							
PROBLEMA CON	AEROBIO	ANAEROBIO	EVAPORACIÓN	RECIRCULACIÓN	MEMBRANAS	SISTEMAS NATURALES	TRATAMIENTO EN PTA
Demanda Bioquímica de oxígeno	Muy altos	Altos	Muy altos	Intermedios	Muy altos	Muy altos	Muy altos
Nutrientes	Altos <sup>(1)</sup>	Muy bajos	Muy altos	Bajos	No <sup>(1)</sup>	No	Variables <sup>(4)</sup>
Metales	Intermedios <sup>(2)</sup>	Altos	Muy altos	Intermedios	Altos	Altos	Altos

PROBLEMA CON	AEROBIO	ANAEROBIO	EVAPORACION	RECIRCULACION	MEMBRANAS	SISTEMAS NATURALES	TRATAMIENTO EN PTA
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	Altos <sup>(3)</sup>	+	Muy altos	+	No <sup>(1)</sup>	+	Variables <sup>(5)</sup>
Patógenos	Bajos	Bajos	Muy altos	Bajos	Muy altos	Variables <sup>(4)</sup>	Variables <sup>(4)</sup>

(1) Pueden ser altos o bajos dependiendo del diseño

(2) Cuando hay pre tratamiento pueden tener remociones muy altas

(3) La remoción se hace por arrastres en el tanque de aireación. Este genera problemas de impacto ambiental

(4) Puede ser muy altos si así se requiere

(5) Puede generar problemas en las conducciones.

*Fuente:* (Giraldo, 1997)

### **3.3.8. Problemas en el tratamiento de lixiviados**

Como se puede observar, el tratamiento de los lixiviados de los rellenos sanitarios es un problema difícil de atacar, tal vez, sin exageración, uno de los problemas más desafiantes en la ingeniería del tratamiento de las aguas residuales. Los problemas más comunes son:

- Cuando existen altos contenidos de nitrógeno, los lixiviados jóvenes pueden llegar a generar problemas de toxicidad por amoníaco en los sistemas biológicos anaerobios para la remoción de DBO.
- El fósforo, que como valor absoluto se encuentra en altas concentraciones, con frecuencia se encuentra insuficiente en los lixiviados jóvenes a la hora de la remoción de la DBO por procesos biológicos, lo que lleva a la necesidad adición de fósforo en el proceso. En los lixiviados viejos el fósforo usualmente no es un factor limitante.



- En los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales no remueven cloruros. Los cloruros interfieren en el ensayo de la DQO y su determinación sirve para controlar la contaminación marina y la tasa de bombeo en acuíferos costeros, en concentraciones mayores de 15.000 mg/L son considerados tóxicos para el tratamiento biológico convencional.
- La alta presencia de detergentes, por otra parte, presenta problemas prácticos importantes a la hora de utilizar procesos biológicos. Si se utilizan procesos aerobios, en donde es necesario introducir aire al agua por medio de sistemas de inyección, la formación de espumas en los tanques de aireación genera problemas operativos difíciles de manejar. En el caso de sistemas anaerobios, en donde se produce biogás en gran cantidad, igualmente se pueden formar espumas que interfieren con el funcionamiento normal del proceso (Crites & Tchobanoglous, 2000).

### **3.4. Reactor anaerobio de flujo ascendente USAB**

Los reactores anaerobios de flujos ascendente (UASB) son procesos de anaerobios modernos que pueden lograr altas eficiencias de tratamiento con un tiempo de retención hidráulica relativamente corto (Renoua, Givaudana, Poulaina, Dirassouyanb, & Moulinec, 2004); en general, tiene un mayor rendimiento en comparación con otros tipos de reactores anaerobios especialmente con valores altos de cargas orgánicas volumétricas. Esta tecnología fue desarrollada en Holanda por Lettinga (1978), es aplicada especialmente en el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica.

En la *Tabla 19* se detalla experiencias exitosas en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios (para reducir carga orgánica), tal es el caso de Mallasa Bolivia, Ambato Ecuador, Montevideo Uruguay y otros más. Podemos observar las diferentes condiciones de operación de los reactores UASB obteniendo

menores costos de operación y alcanza el proceso de nitrificación con mayor rapidez.

**Tabla 19. Rendimientos de reactores UASB en tratamiento de lixiviados**

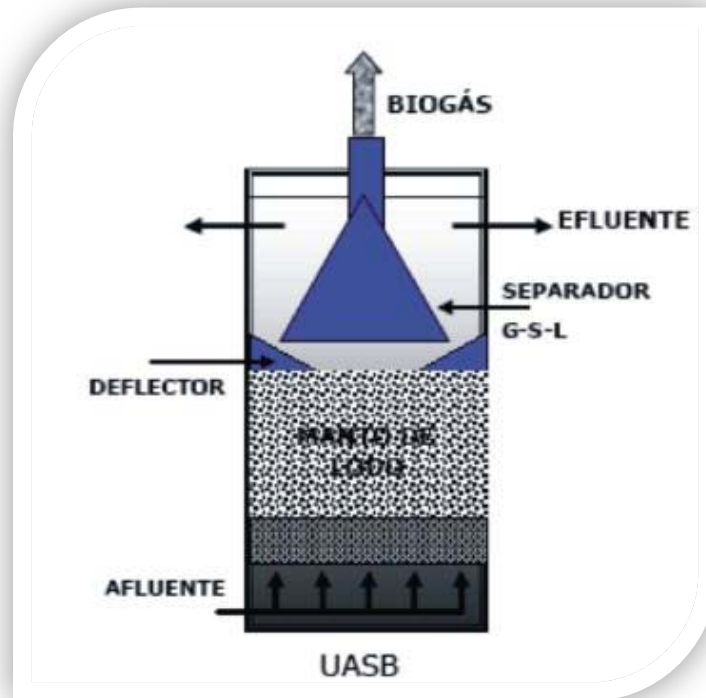
Afluentes			Condiciones operacionales				
DQO	DBO/DQO	pH	Volumen de reactor	Temperatura (C)	Tiempo de retención hidráulica (días)	Eficiencia de remoción (%)	Procedencia
6649 – 15,425	-	7.6 – 8.7	-	-	2.4	88	(1)
10.000 – 64.000	-	61 -7.8	3.5	15- 35	0.6 – 0.1	82	(2)
3000 - 4300	0.65 – 0.67	6.8 – 7.4	0.38	11 - 24	0.4 – 1.4	45-71	(3)
1500 - 3200	0.61 – 0.71	6.5 – 7.0	40	13 - 23	0.96 -1.30	65 - 75	(4)
30,000	-	-	4.6	30	0.75	82	(5)
38000 – 15,900	0.54 – 0.67	7.3 -7.8	2	35	10 – 1.5	83	(6)
3210 – 91.90	-	6.9 – 9.0	6.2	35	0.5 - 1	77 - 91	(7)
24,400	-	7.3	20	36	-	80-90	(8)
14.000 – 51.000	0.5 – 0.6	5.6 – 7.0	-	9.6-22.	0.375	90.14-63	(9)
10810		7.6-8.2	36m <sup>3</sup>	20	0.50	58-49	(10)

(1) Cantabria, España; (2) Tampere, Finlandia; (3) Jyvaskyla, Finlandia; (4) Montevideo, Uruguay; (5) Sao Paulo, Brasil; (6) Ottawa, Canada; (7) South Korea; (8) Istanbul, Turkey; (9) Mallasa, Bolivia; (10) Ambato, Ecuador

*Fuente: Modificado (Renou, Givaudana, Poulaina, Dirassouyanb, & Moulinec, 2004).*

El diseño de un reactor UASB consiste en una zona de reacción en la parte inferior, en la que se acumula la biomasa, la de mejor sedimentabilidad en el fondo y encima los lodos más ligeros.

La operación de los reactores UASB se basa en un tanque en el cual las aguas residuales son introducidas en la parte inferior y salen por la parte superior, estableciendo un flujo ascendente, siendo la mezcla del sistema promovida por el flujo ascensional del fluido y por las burbujas de gas (*Figura 15*).



**Figura 15. Esquema general de un reactor UASB**

*Fuente: [www.wastewaterengineering.com](http://www.wastewaterengineering.com), 2009*

El tratamiento de aguas residuales con reactores tipo UASB es el más difundido en América Latina desde 1988, pues logran eficiencias de remoción comprendidas entre el 60 y 80% de la DQO y la DBO en función de la concentración inicial del agua residual. Los UASB funcionan como tratamiento primario, tratamiento secundario, pero no llegan a eficiencias de remoción superiores al 82%. Para lograrlo, deben ser complementados por sistemas aerobios tradicionales como lodos activados, filtros percoladores o lagunas. En la *Tabla 20* que analizará las ventajas y desventajas de reactor UASB.

**Tabla 20. Ventajas y desventajas del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente USAB, Fuente:**

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor producción de lodo</li> <li>• Menor costo de producción</li> <li>• Convierte el 95% del C en biogás, 5% es transformado en biomasa microbiana</li> <li>• El 90% de la energía es retenida como CH<sub>4</sub>, del 5-7% es almacenada en la biomasa</li> <li>• No requiere energía.</li> <li>• Acepta altas cargas orgánicas</li> <li>• Degrada compuestos policlорados</li> <li>• Requerimiento bajo de nutrientes</li> <li>• Requerimiento pequeña área superficial.</li> <li>• El lodo anaerobio puede ser preservado (inactivo) por muchos meses sin serios deterioros</li> <li>• Una efectiva separación del biogás, desagüe y el lodo.</li> <li>• El lodo anaerobio presenta una buena capacidad de sedimentación y principalmente se desarrolla como un lodo granular.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere largos periodos de arranque, si no se cuenta con los adaptado.</li> <li>• Por ser recientemente establecidos, tienen bajo desarrollo para aplicaciones específicas y existe poca experiencia práctica, sin embargo la situación respecto a esto está cambiando rápidamente.</li> <li>• La digestión anaerobia normalmente requiere de un adecuado post-tratamiento para la remoción de DBO<sub>5</sub> remanente, amonio y compuestos de mal olor.</li> </ul>

*Fuente: (Caicedo Messa, 2006)*

El reactor UASB está siendo experimentado con éxito en el tratamiento de aguas residuales muy diversas de procesos industriales. El tratamiento anaerobio se recomienda para el lixiviado con una relación de DBO/DQO entre

0.7 y 0.3 (residuos parcialmente estabilizados). La biomasa activa puede estar en forma de gránulos compactos o en forma de lodos floculentos con buena sedimentabilidad lo cual convierte en su característica principal la retención de la biomasa sin necesidad de soporte (Caicedo Messa, 2006).

### **3.4.1. Parámetros de diseño para un reactor anaerobio UASB**

Las consideraciones más importantes para un reactor UASB son principalmente las características de aguas residuales en términos de descomposición físico química y contenido de sólidos, carga orgánica volumétrica y velocidad de flujo ascendente, que son las bases del dimensionamiento de los reactores.

#### *3.4.1.1. Características del Agua Residual*

Es importante conocer las concentraciones de proteínas y grasas debido que puede influir en la formación de espumas y afectar a la granulación de lodos, también es importante considerar la relación entre DQO particulado y soluble ya que el incremento de fracción sólido en el agua residual disminuye la fracción de lodos granulados. Por ejemplo para la concentración de sólidos suspendidos totales mayor a 6 g tss/h existen otros procesos anaerobios más adecuados (Metcalf & Eddy, 2003); en el caso de rellenos sanitarios son de interés fundamental la relación de DBO/DQO y los ácidos grasos volátiles presentes en el agua residual que a su vez son función de la edad del relleno sanitario.

#### *3.4.1.2. Carga Orgánica Volumétrica*

Las mayores eficiencias de remoción de DQO (90% - 95%) se han logrado con cargas orgánicas de 12 a 20 kg DQO/m<sup>3</sup>.d en un rango de temperatura de 30-35 °C y con tiempo de retención de entre 4 a 8 horas.

Metcalf y Eddy (2003), recomiendan valores de carga orgánica que van de 3 hasta 25 kg de DQO soluble por metro cúbico diario (*Tabla 21 y 22*) para el diseño de carga orgánica volumétrica dependiendo de la presencia o no de los ácidos grasos volátiles (AGV) en agua residual a tratar (Henry & Heinke, 1996). En el lixiviado del relleno sanitario se ha demostrado que existe ácidos grasos volátiles que se forman durante la fase de fermentación, acetogénesis y metanogénesis (Romero Rojas, 2008), estos ácidos son: ácido acético, propiónico y butírico sus concentraciones deben ser determinadas para confirmar sus concentraciones.

**Tabla 21. Carga volumétrica recomendada para reactores UASB para lograr una carga de remoción DQO de 85 a 95%.**

<b>CARGA VOLUMÉTRICA kg DQO/ m3. d</b>				
DQO del agua residual (mg/L)	Fración particulada DQO	Lodos floculantes del	Lodo granular con alta remoción de sólidos suspendidos	Lodo granular con baja remoción de sólidos suspendidos totales
1000-2000	0.10-0.30	2-4	2-4	8-12
	0.30-0.60	2-4	2-4	8-14
2000-6000	0.60-1.00	na	na	na
	0.10-0.30	3-5	3-5	12-18
6000-9000	0.30-0.60	4-8	2-6	12-24
	0.60-1.00	4-8	2-6	na
	0.10-0.30	4-6	4-6	15-20
9000-18000	0.30-0.60	5-7	3-7	15-24
	0.60-1.00	6-8	3-8	na
	0.10-0.30	5-8	4-6	15-24
	0.30-0.60	na	3-7	na
	0.60-1.00	na	3-7	na

*Fuente: (Metcalf & Eddy, 2003)*

**Tabla 22. Carga volumétrica recomendada para reactores UASB con relación a la temperatura.**

<b>CARGA VOLUMÉTRICA, kg DQO/m<sup>3</sup>.d</b>		
<b>AGUA RESIDUAL AGV</b>		
<b>Temperatura</b>	<b>Rango</b>	<b>Típico</b>
15	2-4	3
20	4-6	5
25	6-12	6
30	10-18	12
35	15-24	18
40	20-32	25

*Fuente: Adaptado a (Metcalf & Eddy, 2003)*

#### *3.4.1.3. Velocidad de flujo ascendente*

Una alta velocidad de flujo ascendente da mayor turbulencia y mejor contacto de la biomasa con el agua residual, la altura del lecho del lodo debe ser la suficiente para minimizar la canalización y para asegurarse que el líquido llegue a velocidad de flujo permisible (1.2 -1.5 m/h) por que puede poner en peligro la retención del lodo y producir lavado del reactor.

Estudios realizados bajo diferentes condiciones de velocidad ascendente del flujo de alimentación (Iñiguez y Camacho, 2011) demuestran que ha mayores velocidades ascendentes se obtiene una menor remoción de DQO soluble y total y a menores velocidades las pérdidas de sólidos suspendidos totales y volátiles son menores; por lo tanto, para un mayor desempeño del reactor y eficiencia del tratamiento se recomienda valores bajos de velocidad, lo que resulta a su vez en tiempos de retención hidráulica (TRH) más altos (*Tabla 23*).

**Tabla 23. Velocidad de flujo ascendente y tiempo de retención hidráulica (TRH).**

Agua residual típico	Velocidad de flujo ascendente m/h		Altura del reactor (m)		THR (h)
	Rango	Típico	Rango	Típico	Típico
DQO 100% soluble	1-3	1.5	6-10	8	5.33
DQO parcialmente soluble	1-1.25	1.0	3-7	6	6.0
Agua residual doméstica	0.8-1.0	0.7	3-5	5	7.14

*Fuente: Adaptado (Metcalf & Eddy, 2003)*

El tiempo de retención hidráulica también se lo podría definir por medio de la temperatura del sitio (tabla 26).

**Tabla 24. Tiempo de retención hidráulica (TRH) recomendado para el tratamiento de aguas residuales doméstica.**

Temperatura °C	Promedio THR
16-19	10-14
22-26	7-9
>26	6-8

*Fuente: Adaptado (Metcalf & Eddy, 2003)*

#### 3.4.1.4. Dimensionamiento del Reactor anaerobio UASB

##### 3.4.1.4.1. Determinación del volumen nominal y efectivo del reactor.

El volumen efectivo del reactor es aquel ocupado por el manto de lodo y la biomasa activa. El volumen adicional es para separación de algunos sólidos y dilución de la biomasa, el volumen nominal del reactor se determina a base de la carga orgánica mediante la *ecuación 1* (Metcalf & Eddy, 2003).

$$V_n = \frac{QS_0}{L_{org}}$$



$V_n$  = Volumen Nominal ( $m^3$ )

$S_0$  = DQO del influente Kg DQO. $m^3$

$L_{org}$  = Carga Orgánica de diseño Kg DQO/ $m^3$ .d

Adicionalmente se debe determinar el volumen de líquido bajo los colectores de gas, utilizando un factor de efectividad el cual es un porcentaje de la fracción ocupado por el manto de lodos, y que varía de 80 a 90%; el volumen de líquido se determina por la *ecuación 2*:

$$V_L = \frac{V_n}{E}$$

$V_L$  = Volumen del líquido ( $m^3$ )

$V_n$  = Volumen Nominal ( $m^3$ )

$E$  = Efectividad (%)

El área del reactor se determina por la *ecuación 3*:

$$A = \frac{Q}{V}$$

$Q$  = Caudal ( $m^3$ )

$V$  = Velocidad del flujo

Y la altura del reactor por la *ecuación 4*:

$$H_L = \frac{V_L}{A}$$

$V_L$  = Volumen del líquido

$A$  = Área del reactor

Además es necesario de un volumen adicional dado por una altura 2.5 a 3 m ( $H_g$ ) con lo que la altura total del reactor se determinaría por la *ecuación 5*:

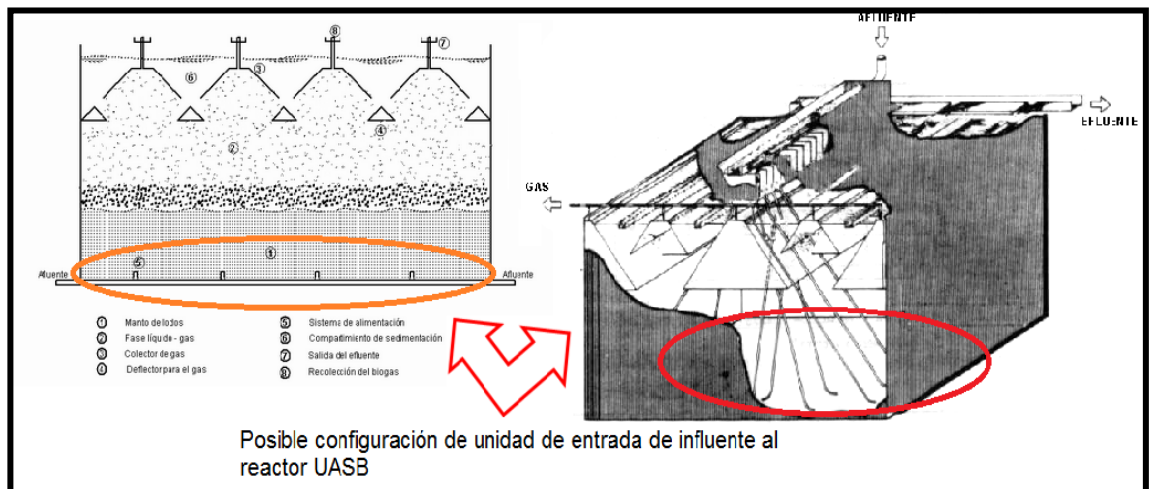
$$H_T = H_L + H_G$$

$H_T$  = Altura Total

$H_G$  = Altura adicional

$H_L$  = Altura del reactor

Además es necesario considerar el dimensionamiento de otras características físicas de importancia del reactor como son: La unidad de entrada del influente, unidad de recolección y separación de gas, unidad de salida del efluente tratado. La unidad de salida debe ser tal que la distribución del flujo sea uniforme y que se evite la tubificación y formación de zonas muertas, esta unidad va ubicada en el fondo del reactor y consta de una serie de tuberías que conduce el flujo asía diferentes áreas al fondo del reactor como se muestra en la *Figura 17*.



**Figura 16. Posible Configuración de unidad de entrada de influente al reactor UASB**

*Fuente: (Aisse, 2000)*

#### *3.4.1.4.2. Características físicas a considerar en el dimensionamiento.*

Las principales características físicas que requieren una cuidadosa consideración son: la entrada de alimentación, separación de gas, recogida de

gas, y la retirada del efluente. La entrada de alimentación debe estar diseñada para proporcionar una distribución uniforme y para evitar la canalización o la formación de zonas muertas. La evitación de la canalización es más crítica para las aguas residuales débiles. El número de tubos de alimentación de entrada se utilizan para dirigir el flujo a diferentes zonas de la parte inferior del reactor UASB de una fuente de alimentación común. Se debe proporcionar acceso para limpiar las tuberías en caso de obstrucción.

Las directrices para la determinación del área servida por los tubos de alimentación de entrada individual en función de las características de los lodos y la carga orgánica que se proporcionan en la *Tabla 25*.

**Tabla 25. Directrices para dimensionar el área servida por los tubos de alimentación de entrada de reactor UASB.**

Tipos de lodos	Carga DQO kg/m <sup>3</sup> .d	Entrada de alimentación, m <sup>2</sup>
Lodos floculante denso >40 kg TSS/m <sup>3</sup>	<1.0	0.5-1
	1-2	1-2
	>2	2-3
Lodos floculante denso 20-40 kg TSS/m <sup>3</sup>	<1-2	1-2
	>3	2-5
Lodo granular	1-2	0.5-1
	2-4	0.5-2
	>4	>2

*Fuente:* (Metcalf & Eddy, 2003)

El separador de sólidos de gas (GSS) está diseñado para recolectar el biogás, prevenir lavado de sólidos, separación de partículas de gases y sólidos, permiten volver a caer los sólidos en la zona de manto de lodo, y ayuda a mejorar la remoción del efluente sólido. Una serie de deflectores en forma de V al revés se utiliza junto a vertederos de aguas residuales para lograr los

objetivos mencionados. Directrices para el diseño del separador de sólidos de gas se mencionan en la *Tabla 26*.

**Tabla 26. Características físicas a considerar en un reactor UASB.**

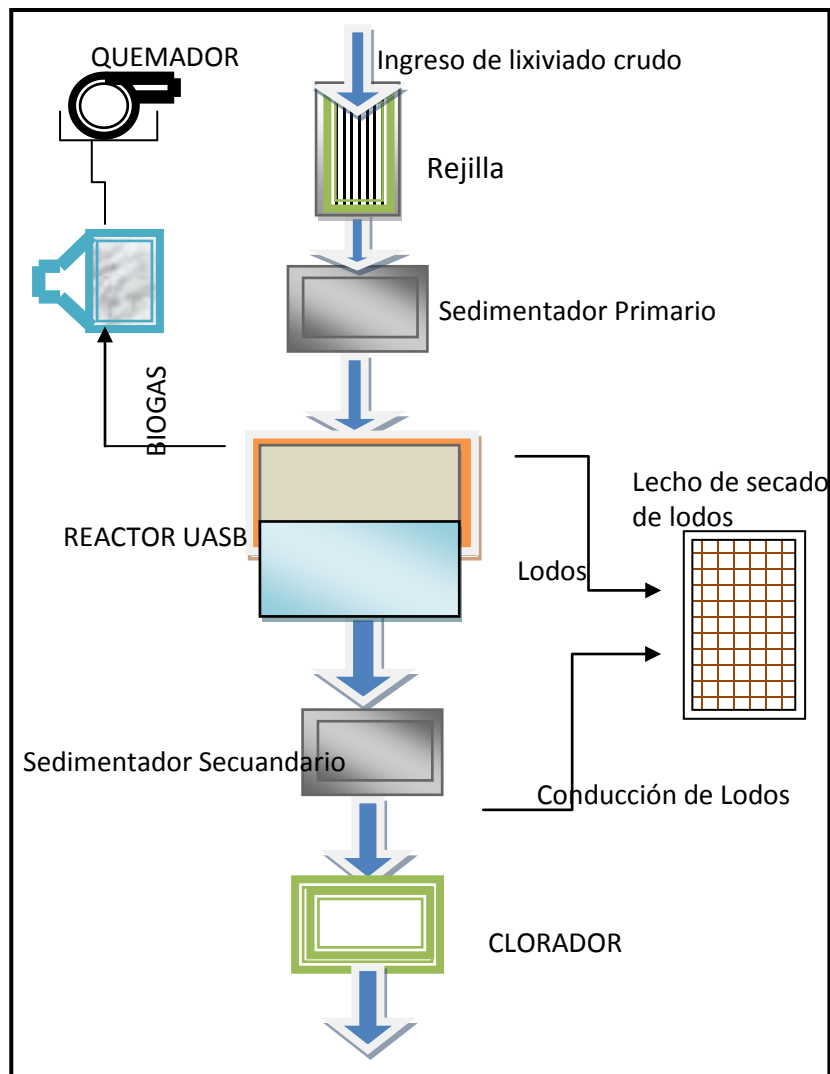
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS A CONSIDERAR EN UN REACTOR UASB</b>
<p>La pendiente de la parte inferior del sedimentador; es decir, la pared inclinada del colector de gas, debe estar entre 45 y 60°.</p> <p>El área superficial de las aberturas entre los colectores de gas no debe ser menor que 15 a 20% de la superficie total del reactor.</p> <p>La altura del colector de gas debe estar entre 1,5 y 2 metros de la altura de un reactor de 5-7 m.</p> <p>Una interfaz líquido-gas se debe mantener en el colector de gas para facilitar la liberación y la colección de burbujas de gas y para controlar la formación de una capa espumosa.</p> <p>El traslape de los baffles (deflectores) instalados debajo de las aberturas deben ser de 10 a 20 cm para evitar las burbujas de gas hacia arriba del flujo que entran en el comportamiento de los sedimentadores.</p> <p>Generalmente los deflectores para capas de natas deben ser instalados delante de los vertederos del efluente.</p> <p>El diámetro de los tubos de escape de gas debe ser suficiente para garantizar la fácil remoción del biogás de la campana recolectora de gas, particularmente en el caso de formación de espuma.</p> <p>En la parte superior de la campana de gas, deben instalarse boquillas rociadoras antiespumantes, en el caso de tratamiento de las aguas residuales con alto contenido de espuma.</p>

*Fuente: (Metcalf & Eddy, 2003)*

### 3.5. Selección de procesos para el tratamiento de lixiviados.

La *Figura 17* muestra el esquema general del proceso necesario para realizar el tratamiento de los lixiviados. El esquema considera varias etapas de tratamiento físico-químico para la optimización de un proceso biológico anaerobio UASB, enfocados en la eliminación de los principales contaminantes presentes en el efluente.

Este esquema de tratamiento presenta un sistema integral que incluye:



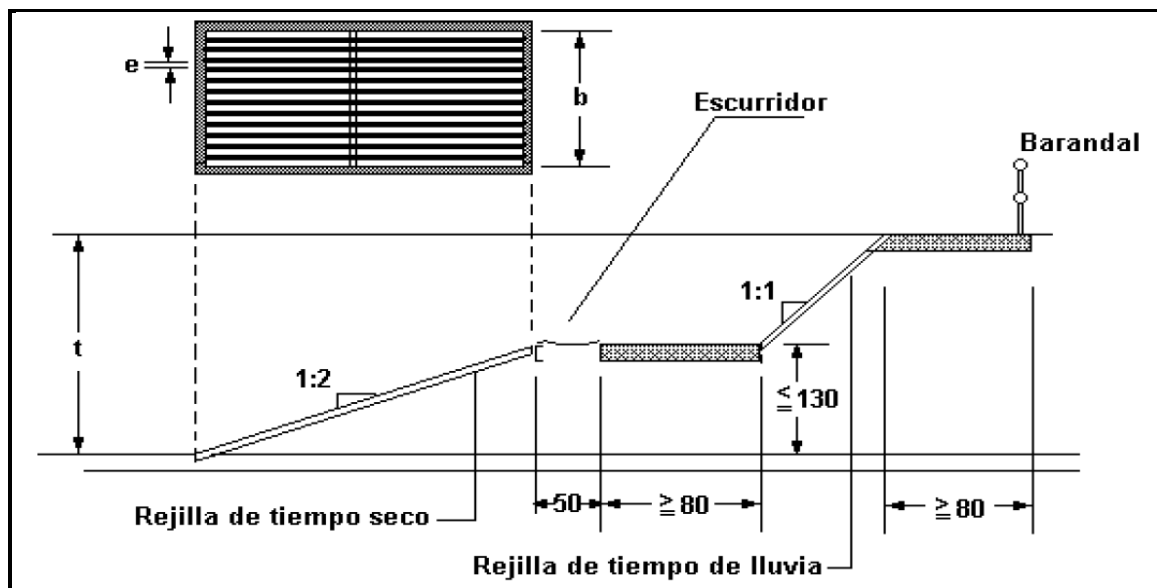
**Figura 17. Esquema de un tren de tratamiento de lixiviados**

*Fuente: Elaboración propia*

**Sistema preliminar.-** Este sistema es el que actúa eliminando los materiales flotantes y que contiene grandes contenidos de partículas inorgánicas que son los causantes de problemas en el funcionamiento primario y secundario, en este caso se utilizará una rejilla.

El propósito fundamental de los dispositivos de cribado es proteger a las bombas y otros equipos electromecánicos y prevenir el atascamiento de válvulas. Por este motivo la primera operación que se lleva a cabo en el influente del lixiviado es el cribado.

El emparrillado de las rejillas, es su estructura funcional, está inclinado con respecto al piso del canal donde se instalan y puede ser de dos tipos generales: de limpieza manual y de limpieza mecánica como se muestra en la *Figura 18*.

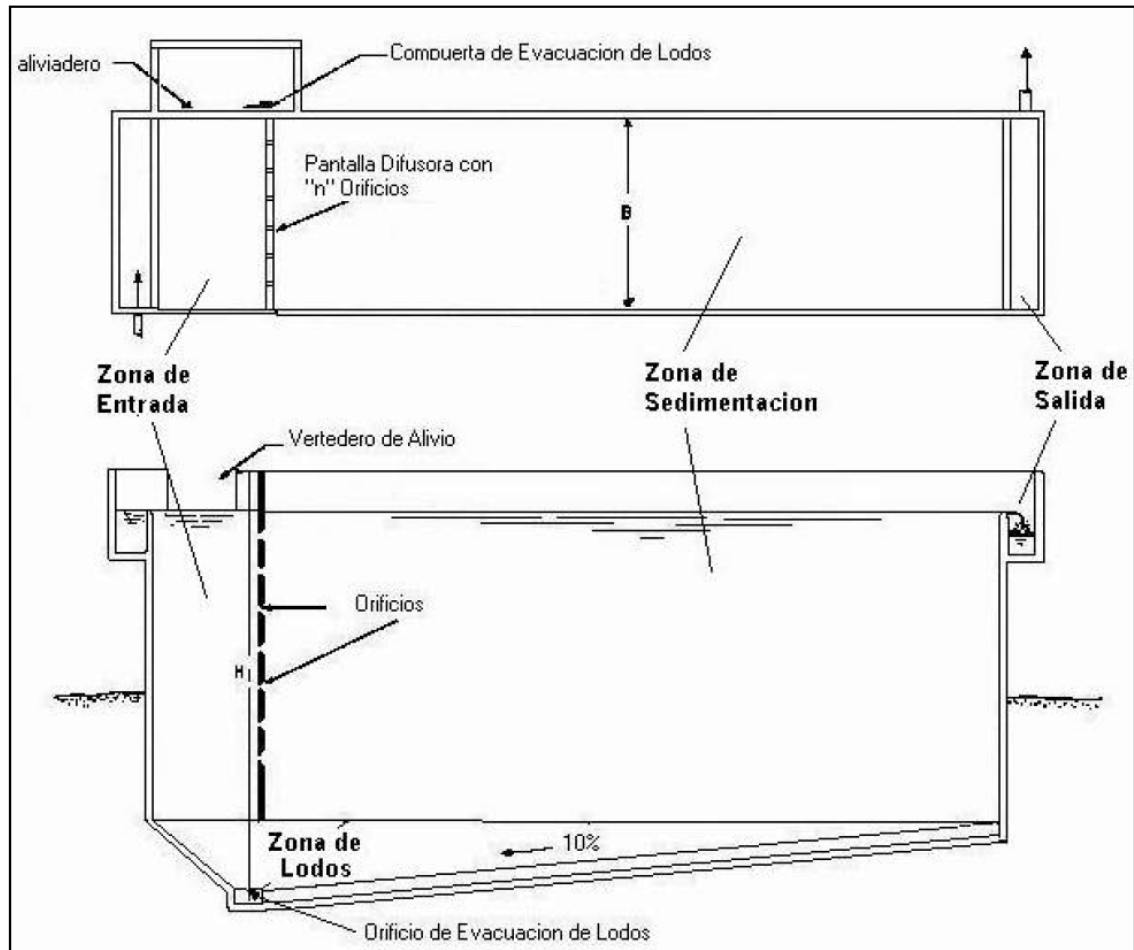


**Figura 18. Rejilla de limpieza manual**

*Fuente: (OPS/CEPIS, 2005)*

**Sistema Primario.-** este sistema de tratamiento primario incluye todas las unidades del tratamiento preliminar y posee un tanque de sedimentación primario, donde la eliminación de la mayor parte de materiales flotantes se lleva a cabo en la cámara de pantalla y la mayoría de sólidos en suspensión

(partículas inferiores de 0.2 mm y superiores de 0.05 mm) se separan en este proceso, esto quiere decir que en el tratamiento primario se reduce del 60 a 70% de sólidos en suspensión.



**Figura 19. Vista en planta y corte longitudinal de un sedimentador**

*Fuente: (OPS/CEPIS, 2005)*

**Sistema Secundario.-** Después del tratamiento primario, adicionalmente se trata al lixiviado para la eliminación de coloidal y la alta carga orgánica presente en el lixiviado empleando un reactor UASB para eliminar el contenido restante en un tiempo de retención menor, como se detalla en la *sección 3.4* de este trabajo.

**Desinfección.-** Los métodos de desinfección de las aguas servidas son principalmente la cloración y la ionización, pero también se ha usado la bromación y la radiación ultravioleta. El más usado es la cloración por ser barata, fácilmente disponible y muy efectiva. Desde el punto de vista de la salud pública se encuentra aceptable el agua servida que contiene menos de 1.000 coliformes totales por 100 ml y con una DBO inferior a 50 mg/L (Metcalf & Eddy, 2003) .

La estructura que se usa para efectuar la cloración es la cámara de contacto. Consiste en una serie de canales interconectados por los cuales fluye el agua servida tratada de manera que ésta permanezca al menos 20 minutos en contacto con el cloro, tiempo necesario para dar muerte a los microorganismos patógenos.

#### **4. MARCO LEGAL**

En Ecuador la Legislación ambiental secundaria regula las diferentes opciones para la disposición final del efluente tratado: descarga a un cuerpo de agua superficial, infiltración y verterlo al alcantarillado.

La decisión de dónde disponer o usar un efluente tratado depende de diversos factores como el terreno disponible, la cercanía a algún cuerpo de agua o de napas, la topografía, características del agua residual y los recursos económicos disponibles.

En este caso, se seleccionó la opción de utilizar el lixiviado tratado para descargar al alcantarillado ya que cuenta con terreno apropiado para realizar este tipo de sistema, además no se encuentra cuerpos de agua cerca del sector



#### 4.1. Normativa Ecuatoriana para la descarga de efluentes

En el marco jurídico ambiental se analizarán bajo las normas ambientales vigentes a escala nacional, regional y local, como son: Constitución Política de la República del Ecuador, Ley de Gestión Ambiental, Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental y sus reglamentos, Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Ley de Aguas.

##### ***4.1.1. Texto unificado de legislación secundaria ambiental de la república del Ecuador, libro VI anexo 1: Norma de Calidad ambiental, para la descarga de efluentes: Recurso agua.***

Son de particular interés para el presente trabajo de grado, los límites de concentraciones de contaminantes establecidos en los siguientes apartados:

- Normas generales para descarga de efluentes, tanto al sistema de alcantarillado, como a los cuerpos de agua.
- Normas de descarga de efluentes al sistema de alcantarillado público.
- Normas de descarga de efluentes a un cuerpo de agua o receptor: Agua dulce y agua marina

La norma tiene como objetivo la prevención y control de la Contaminación Ambiental, en lo relativo al recurso agua y de preservar la integridad de las personas, de los ecosistemas y sus interrelaciones y del ambiente en general, teniendo en la *Tabla 27* los límites permisibles.

**Tabla 27. Límites de descargas al sistema de alcantarillado público.**

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Aceites y grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	100
Alkil mercurio		mg/l	No detectable

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Ácidos o bases que puedan causar contaminación		mg/l	Cero
Sustancias explosivas o inflamable			
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsenio Total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	5,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Carbonatos	CO <sub>3</sub>	mg/l	0,1
Caudal máximo		l/s	1.5 veces el caudal promedio horario del sistema de alcantarillado
Cianuro Total	CN <sup>-</sup>	mg/l	1,0
Cobalto total	Co	mg/l	0,5
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cloroformo	Extracto Carbón cloroformo (ECC)	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cromo Hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/l	0,5
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,2
Demanda Química de Oxígeno (5 días)	D.B.O5	mg/l	250
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O	mg/l	500
Diclorcetileno	Diclorcetileno	mg/l	1,0
Fosforo Total	P	mg/l	15
Hierro Total	Fe	mg/l	25
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20
Manganeso Total	Mn	mg/l	10,0
Materia flotante	Visible	mg/l	Ausencia
Mercurio (Total)	Hg	mg/l	0,01
Níquel	Ni	mg/l	2,0

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Nitrógeno Total Kjedahl	N	mg/l	40
Plata	Ag	mg/l	0,5
Plomo	Pb	mg/l	0,5
Potencia de hidrogeno	pH	mg/l	5-9
Sólidos Sedimentables		mg/l	20
Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	220
Sólidos Totales		mg/l	1600
Selenio	Se	mg/l	0,5
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	mg/l	400
Sulfuros	S	mg/l	1,0
Temperatura	°c	mg/l	<40
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	2,0
Tricloroetileno	Tricloroetileno	mg/l	1,0
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0
Sulfuro de carbono	Sulfuro de carbono	mg/l	1,0
Compuestos organoclorados (totales)	Concentración organoclorados totales	mg/l	0,05
Organofosforados y carbamatos (totales)	Concentración de organofosforados y carbamatos totales	mg/l	0,1
Vanadio	V	mg/l	5,0
Zinc	Zn	mg/l	10

*Fuente:* (Ministerio del Ambiente, 2003)

**4.1.2. Texto unificado de legislación secundaria ambiental de la republica del Ecuador, libro VI anexo 6: Manejo de desechos sólidos no peligrosos.**

Son de particular interés para el presente trabajo de grado los criterios para el manejo de los desechos sólidos no peligrosos, desde su generación hasta su disposición final.

El TULSMA indica en el libro VI anexo 6 que para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios debe realizarse como mínimo los análisis físico-químicos captados en los efluentes del botadero de desechos sólidos como son: Temperatura, pH, DBO5, DQO, sólidos totales, nitrógeno total, fósforo total, dureza, alcalinidad, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, hierro, sodio, potasio, sólidos disueltos, plomo, mercurio, cadmio, cromo total, cianuros, fenoles y tenso activos. Los lixiviados generados deben ser tratados, de tal manera que cumplan con lo establecido en la Norma de Aguas, en lo referente a los parámetros establecidos para descarga de los efluentes a un cuerpo de agua.

#### **4.2. Comparación de las características físico-químicas típicas de un lixiviado con las normas de calidad.**

En la *Tabla 28* observaremos que parámetros de las características físico-químicas típicas de un lixiviado están dentro de las normas permisibles del TULSMA.

**Tabla 28. Comparación de las características físico-químicas típicas con las normas permisibles.**

<b>PARÁMETROS</b>	<b>RANGO TÍPICO Nuevo &lt; 2 años</b>	<b>NORMAS PERMISIBLES</b>
DQO	3000 - 60000	500
DBO5	2000 - 30000	250
SST	200 - 2500	220
NITRÓGENO TOTAL	20 - 1500	40
FÓSFORO TOTAL	5 - 100	15
ALCALINIDAD	1000 - 10000	
SALES SOLUBLES	200 - 4000	

<b>PARÁMETROS</b>	<b>RANGO TÍPICO Nuevo &lt; 2 años</b>	<b>NORMAS PERMISIBLES</b>
HIERRO	5 - 1200	25
PLOMO	1 -10	0,5
ZINC	25 - 250	10
PH	5 -8	5-9

## **5. EL RELLENO SANITARIO**

### **5.1. Descripción del relleno sanitario “Las Iguanas”**

El relleno Sanitario “Las iguanas” se encuentra en la ciudad de Guayaquil donde su población está cercana a los 3 millones de habitantes y su tasa de crecimiento anual del 2.2%, su zona es tórrida, su clima es tropical lluviosa y la precipitación promedio anual es de 1,400.00 mm, la temperatura varía de 18 °C (min) a 36 °C (max).

Los desechos sólidos de Guayaquil son inicialmente dispuestos desde 1994 en el Relleno Sanitario Las Iguanas a razón de 1,261 toneladas /día, y actualmente a razón de 2,885 toneladas / día, siendo el promedio diario en estos 15 años de 2,168.80 toneladas. Se estima que la cobertura del servicio es superior al 95%.

La recolección se realiza de manera ininterrumpida las 24 horas del día durante todos los días, con vehículos recolectores de 20 ton de capacidad (*Figura 20*) y de esta manera da inicio a sus unidades operativas que son:

- Recolección de desechos sólidos
- Control de ingreso y pesaje
- Recepción y disposición de los residuos sólidos en plataformas
- Captación y tratamiento de lixiviado

- Captación y quema del biogás.

Existe bajo el lecho del relleno un estrato de arcilla muy cohesiva de un espesor de >10 m y permeabilidad de  $1 \times 10^{-8}$  cm/s, el método escogido por el relleno sanitario es el de “barranco” o “vaguada”.

El relleno sanitario recibe directamente todos los residuos generados en las viviendas, los rechazos de mercados, curtiembres, escombros, desechos hospitalarios en general todos los desechos de la ciudad de Guayaquil, teniendo su gran composición en residuos alimenticios como se detalla en la *Tabla 29*.

**Tabla 29. Composición de los residuos sólidos del relleno sanitario “Las Iguanas”.**

COMPOSICIÓN RESIDUOS SÓLIDOS	PORCENTAJE	
Plásticos recuperables	1,62%	31,04%
Plásticos no recuperables	6,19%	
Cartones y papeles	5,99%	
Envolturas para alimentos (Cachitos, chifles, papas,...)	0,64%	
Latas	0,40%	
Vidrios	0,84%	
Madera, Aserrín	7,03%	
Tela	1,62%	
Zapatos	0,36%	
Pañales	3,37%	
Caucho, llantas	0,66%	
Materiales de construcción	2,32%	
Residuos de Alimentos		
<b>TOTAL</b>		<b>100,00%</b>

*Fuente:* (Consortio-ILM "Las Iguanas", 2012)



**Figura 20. Operación del relleno sanitario "Las Iguanas"**

*Fuente:* (Consortio-ILM "Las Iguanas", 2012)

El relleno sanitario cuenta con 4 sectores (A, B, C, D) donde los desechos putrescibles son depositados en el Sector "D" desde el año 2006 y con anterioridad en los Sectores "A" y "C". Los NO putrescibles se depositan en el Sector "B" y corresponden principalmente a desechos de construcción.

El sector A empezó a operar en septiembre 1994 con fecha de cierre octubre 2004 dando inicio al sector C hasta septiembre del 2011, y ahora se encuentra operando el sector D.

Podemos observar en la *Tabla 31, 32 y 33* datos generales de los desechos dispuesto en el relleno sanitario (hasta el 2012), la producción y la proyección por producir de lixiviado.

**Tabla 30. Datos del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas” sector D.**

<b>SECTOR D</b>		
Total desechos dispuestos al 30 abril 2011	4'722,329.32	toneladas
Lixiviado producido al 30 sept 2011	643,662.21	m3
Relación lixiviado (m3)/ton desechos	17.44%	etapa operación

*Fuente: (Consortio-ILM "Las Iguanas", 2012)*

**Tabla 31. Datos del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas” sector A.**

<b>SECTOR A (cerrado actualmente)</b>		
Total desechos dispuestos	6'103,972.3	toneladas
Lixiviado producido etapa de operación	643,662.21	m3
Relación lixiviado (m3)/ton desechos	10.54%	etapa operación
Lixiviado producido hasta sept 2011	963,662.21	m3
Proyección lixiviado por producir	23,533.65	m3
Total proyección lixiviado a producirse	987,195.86	m3
Relación lixiviado (m3)/ton desechos	16.17%	estimación total

*Fuente: (Consortio-ILM "Las Iguanas", 2012)*

**Tabla 32. Datos del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas” sector C**

<b>SECTOR C (cerrado actualmente)</b>		
Total desechos dispuestos	1'811,396.45	toneladas
Lixiviado producido etapa de operación	104,277.63	m3
Relación lixiviado (m3)/ton desechos	5.76%	etapa operación
Lixiviado producido hasta sep 2011	276,563.2	m3
Proyección lixiviado por producir	7,967.17	m3
Total proyección lixiviado a producirse	284,530.37	m3
Relación lixiviado (m3)/ton desechos	15.71%	estimación total

*Fuente: (Consortio-ILM "Las Iguanas", 2012)*

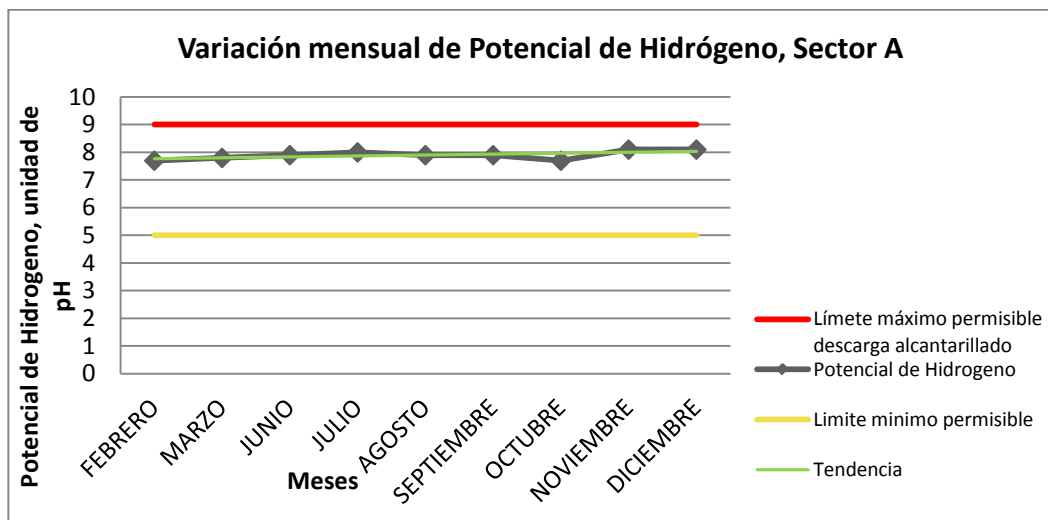


## 5.2. Calidad de lixiviados en el relleno sanitario “Las Iguanas”

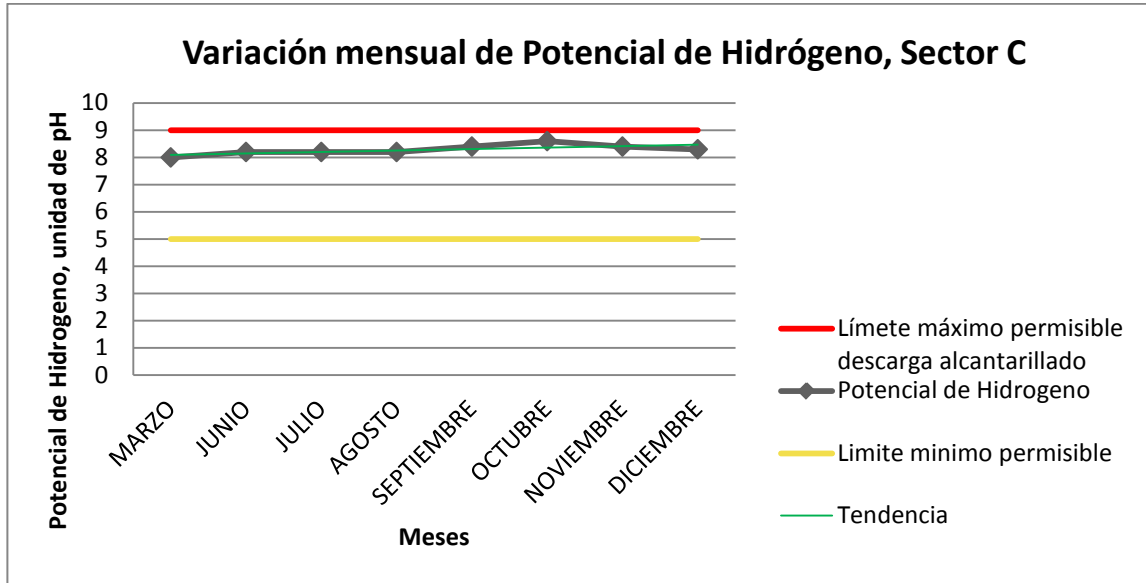
Podemos observar, en el *Anexo 1*, información proporcionada por el Consorcio ILM sobre los análisis de laboratorio obtenido mes a mes durante el año 2012 donde se detallan los parámetros existentes en el lixiviado. En las siguientes gráficas (Gráfica 1 hasta 78) se indicará la variación de los parámetros y la tendencia con el pasar de los meses que son muy importantes para seleccionar el tratamiento indicado para el lixiviado. Cabe recalcar que las caracterizaciones que se realizan mes a mes no incluyen como parámetro los cloriformes fecales o totales.

**Potencial de Hidrógeno.-** La influencia del pH sobre la producción de metano está relacionada con la concentración de AGV. Los diferentes grupos bacterianos presentan niveles de actividad satisfactorios a pH; los hidrolíticos entre 7,2 y 7,4, los acetogénicos entre 6,5 y 7,5. Las bacterias metanogénicas disminuyen su actividad si el pH aumenta por encima de 7,8. Cuando la capacidad metanogénica está continuamente sobrecargada y no se añade la base necesaria para neutralizar los AGV presentes, el sistema de tratamiento se convertirá en un reactor de acidificación.

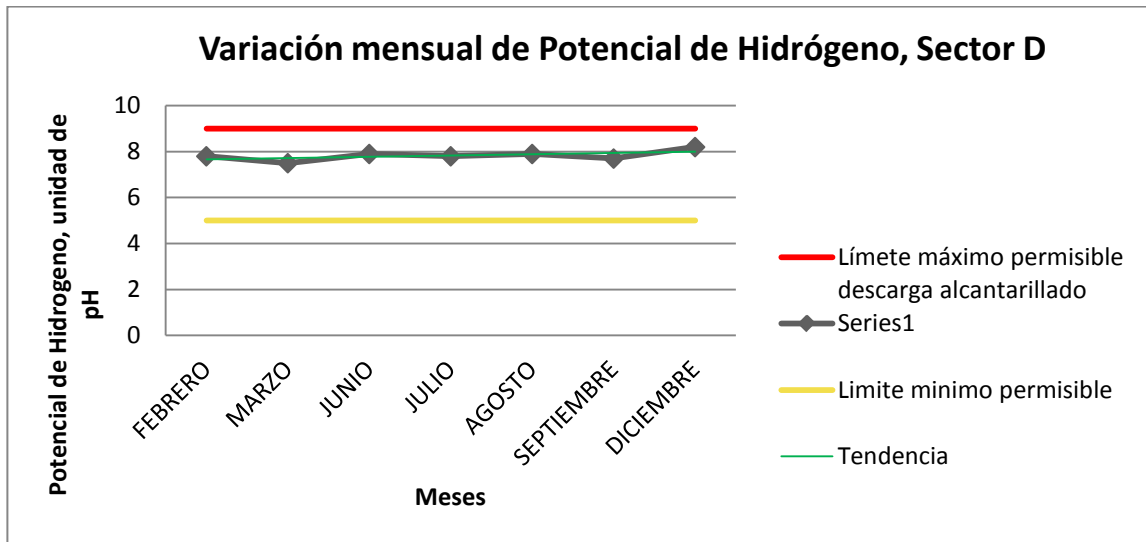
Gráfica 1. Variación mensual de pH, sector A



**Gráfica 2. Variación mensual de pH, Sector C**



**Gráfica 3. Variación mensual de pH, Sector D**



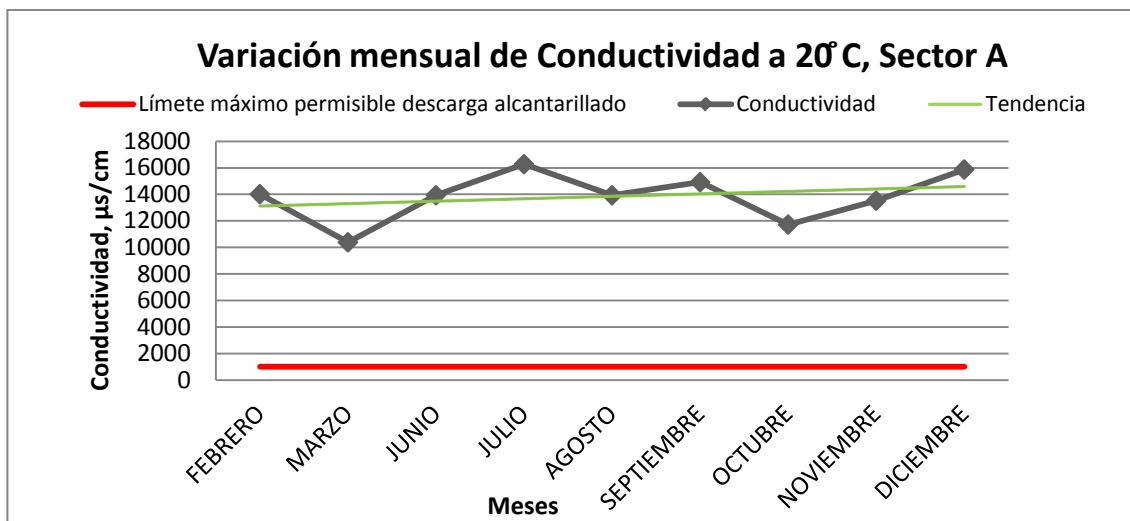
*Fuente:Elaboración propia*

**La conductividad eléctrica (CE).**- del agua es una medida de su habilidad para conducir corriente eléctrica. Conforme los iones aumentan también lo

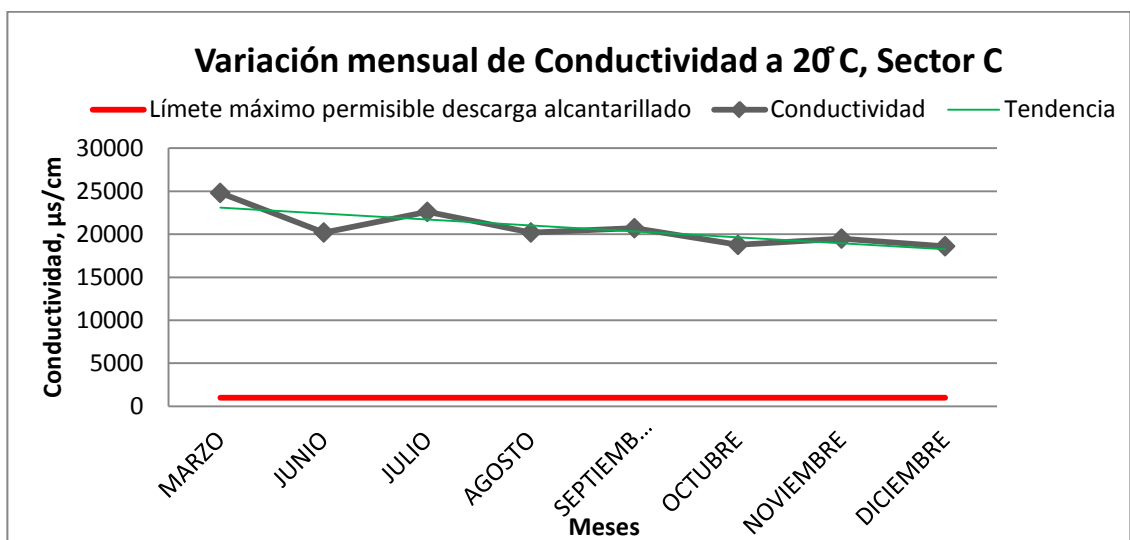
hace la conductividad. Por eso se la usa como subrogante para medir la concentración de SDT (sólidos disueltos totales).

Hasta entrada 1970 las unidades de CE era micromhos/cm, y se lo cambió a microSiemens/cm. ( $1\mu\text{S}/\text{cm} = 1\ \mu\text{mho}/\text{cm}$ ). En Unidades S.I. se la mide como milisiemens por metro (mS/m). No se debe usar este subrogante para aguas residuales crudas, aguas industriales y otras con concentraciones altas.

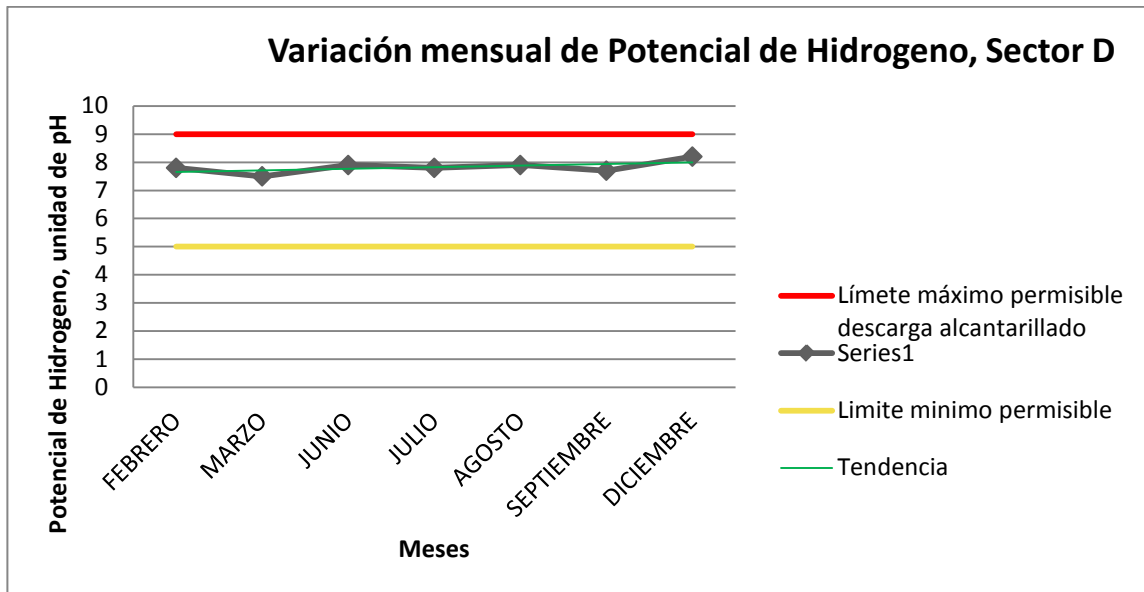
**Gráfica 4. Variación mensual de Conductividad, Sector A**



**Gráfica 5. Variación mensual de Conductividad, Sector C**



Gráfica 6. Variación mensual de Conductividad, Sector D



Fuente:Elaboración propia

**Residuos o sólidos.-** La materia suspendida o disuelta que se encuentra en un agua residual recibe el nombre de sólidos o residuos. Se divide en tres categorías:

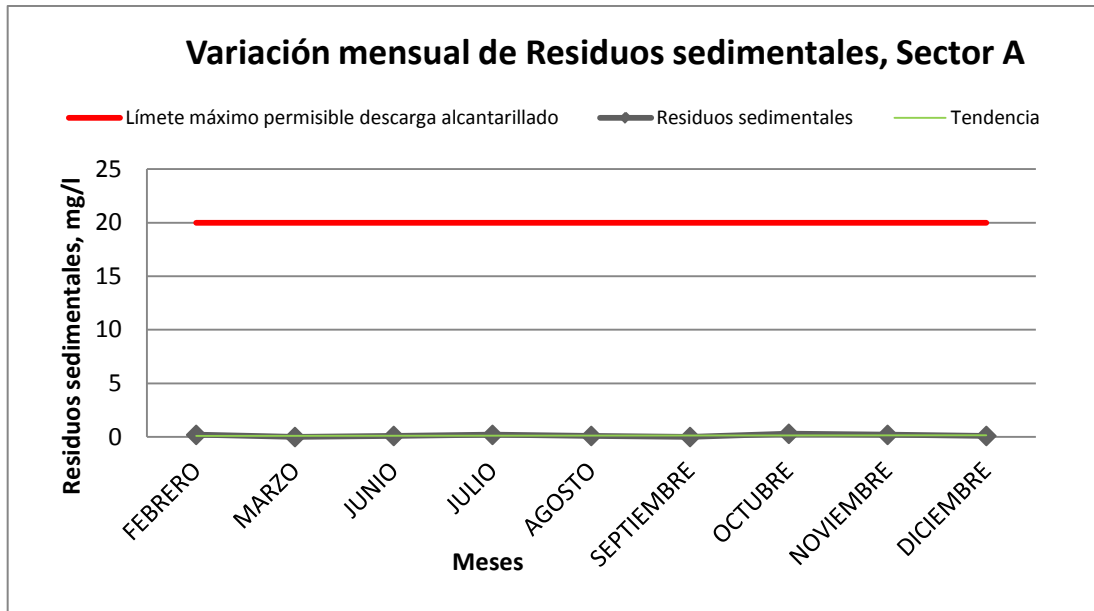
Residuos Totales: sedimentables, suspendidos y disueltos.

- Residuos Suspendidos: porción retenida por el papel filtro de  $1,3\mu\text{m}$  de tamaño de poro.
- Residuos Disueltos: porción que pasa por el papel filtro de  $1\mu\text{m}$  de tamaño de poro.

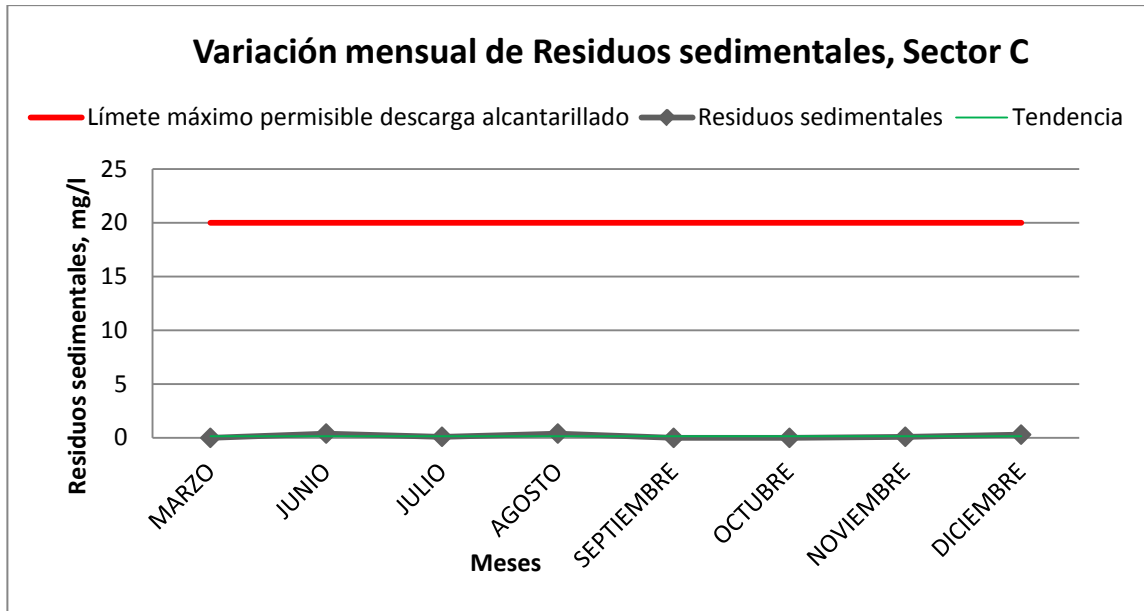
La determinación de los sólidos es una prueba indispensable para la operación de reactores biológicos, que junto con otros parámetros, proporciona información de la eficiencia de remoción del proceso, e indirectamente, de la concentración de biomasa bacteriana en el reactor.

Los sólidos suspendidos volátiles (SSV) representan la porción orgánica de los sólidos suspendidos totales (SST); estos últimos representan el parámetro ambiental para el cobro de tasa retributiva.

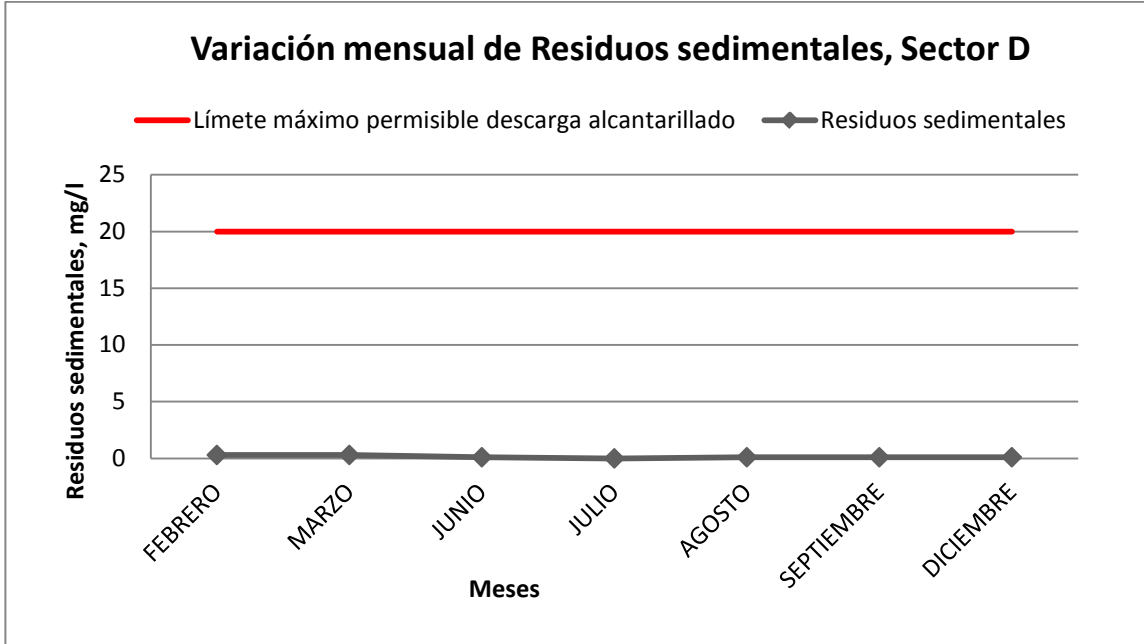
**Gráfica 7. Variación mensual de Residuos Sedimentales, Sector A**



**Gráfica 8. Variación mensual de Residuos Sedimentales, Sector C**

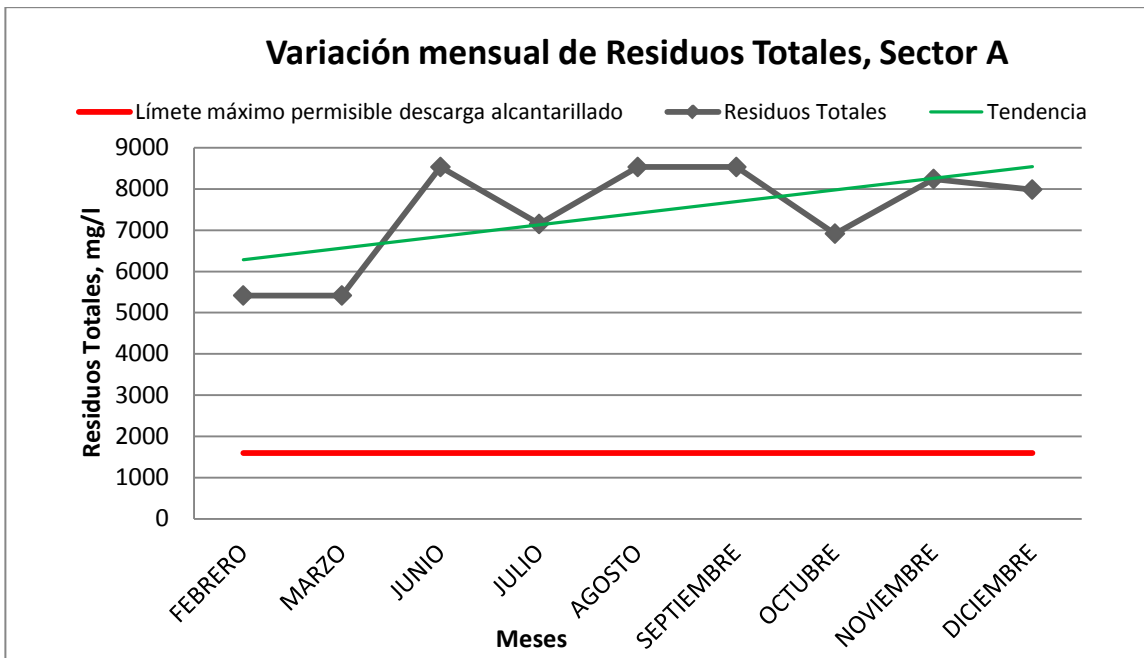


**Gráfica 9. Variación mensual de Residuos Sedimentales, Sector D**

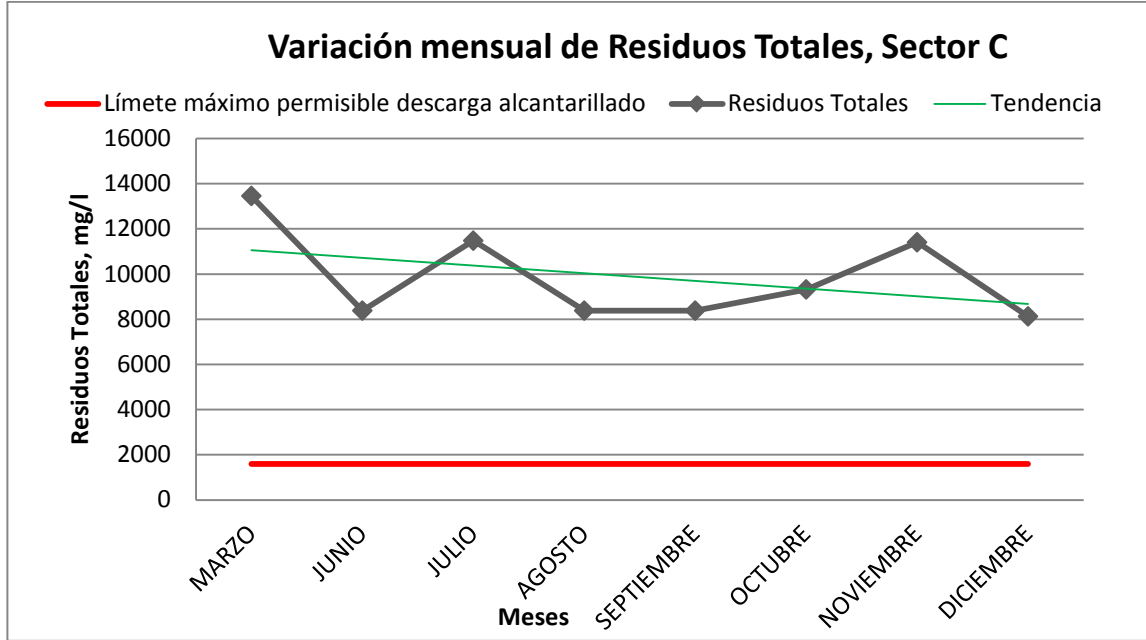


*Fuente:Elaboración propia*

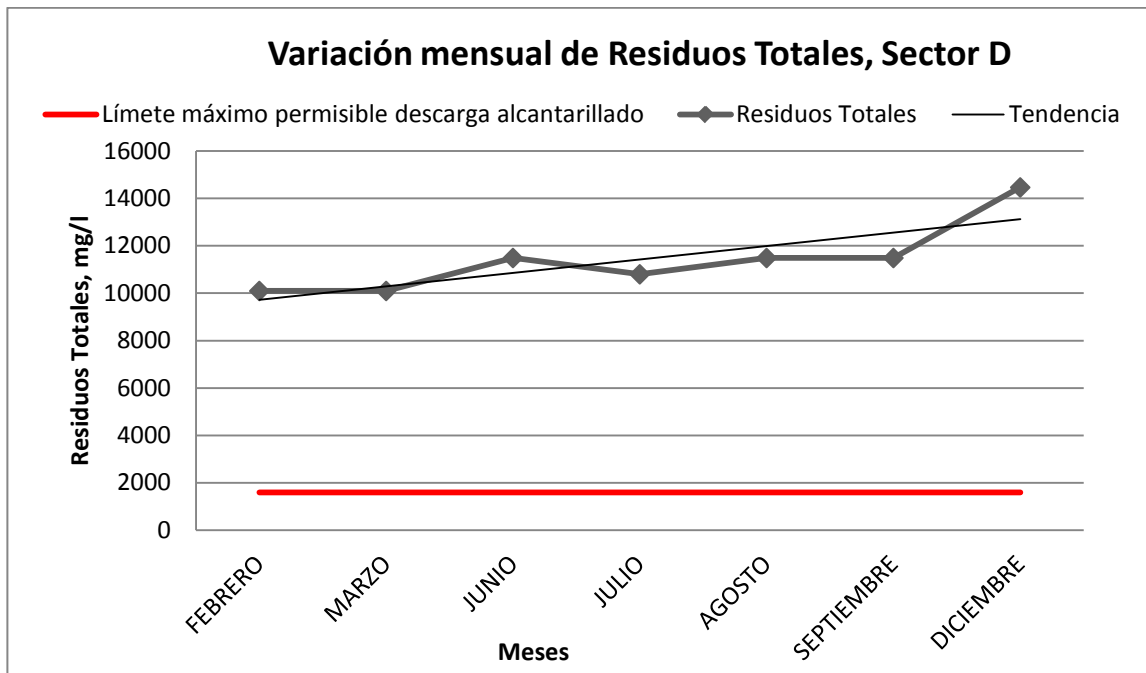
**Gráfica 10. Variación mensual de Residuos Totales, Sector A**



**Gráfica 11. Variación mensual de Residuos Totales, Sector C**

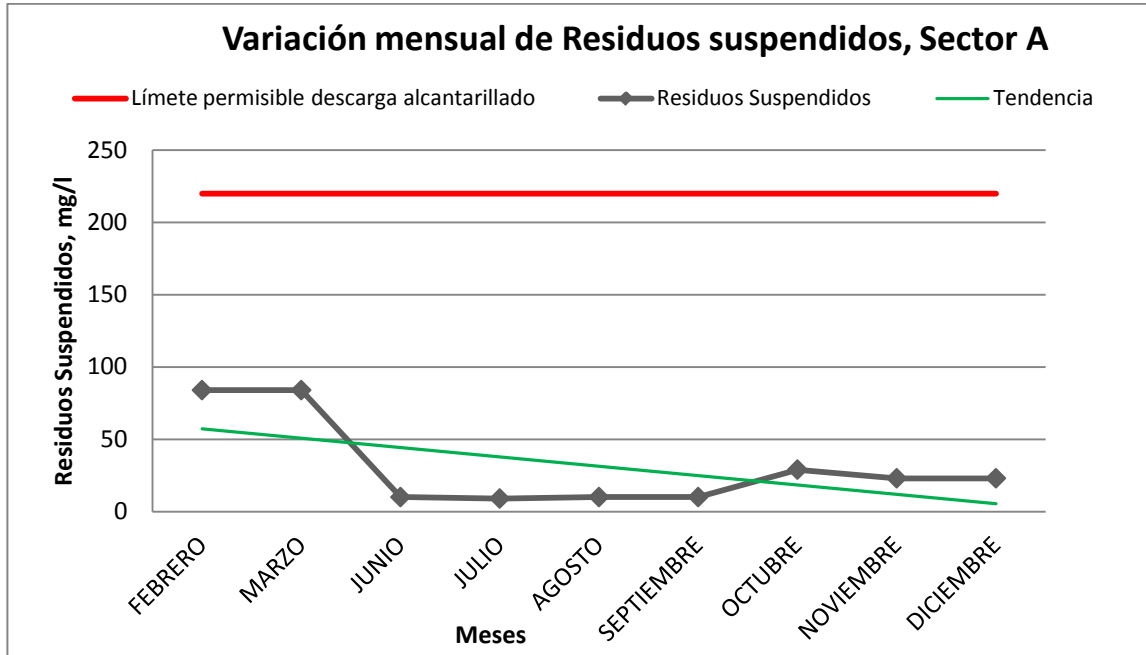


**Gráfica 12. Variación mensual de Residuos Totales, Sector D**

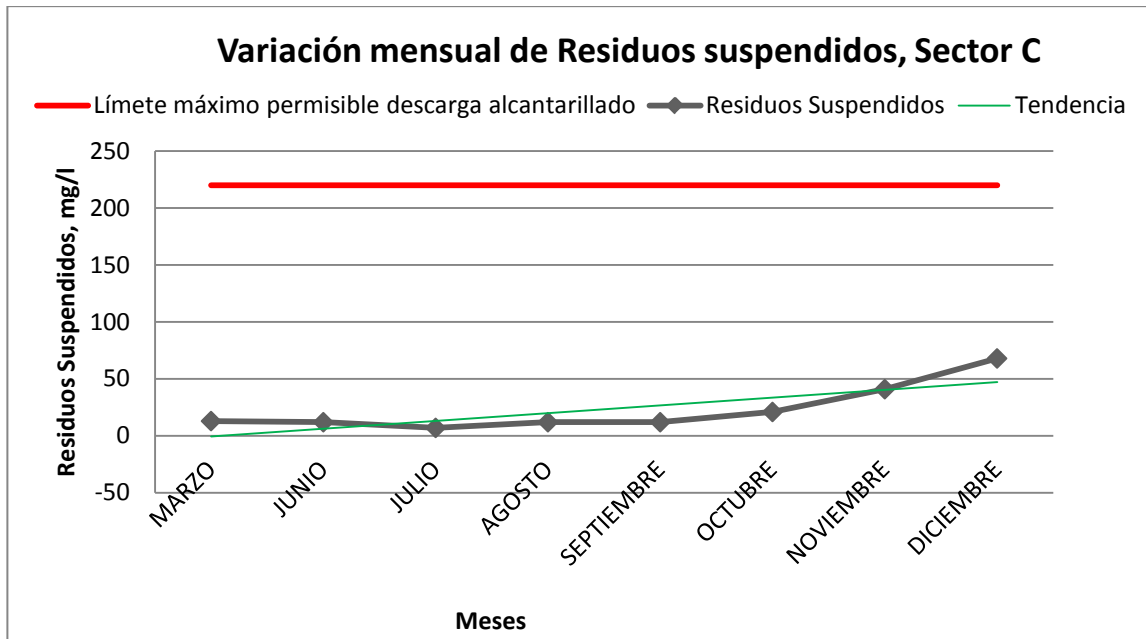


*Fuente:Elaboración propia*

**Gráfica 13. Variación mensual de Residuos suspendidos, Sector A**

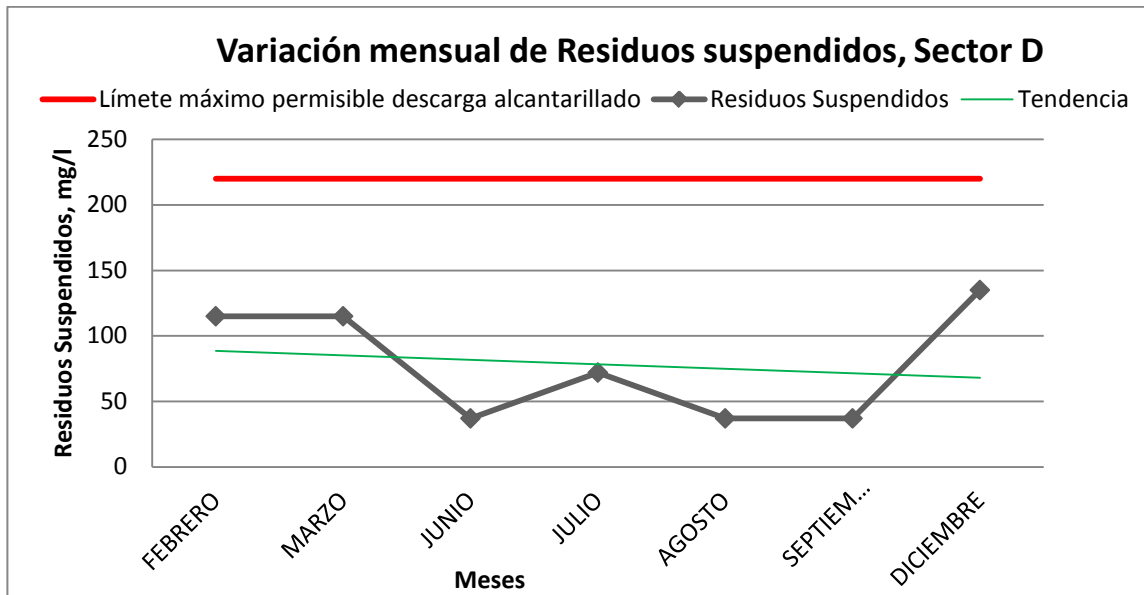


**Gráfica 14. Variación mensual de Residuos suspendidos, Sector C**





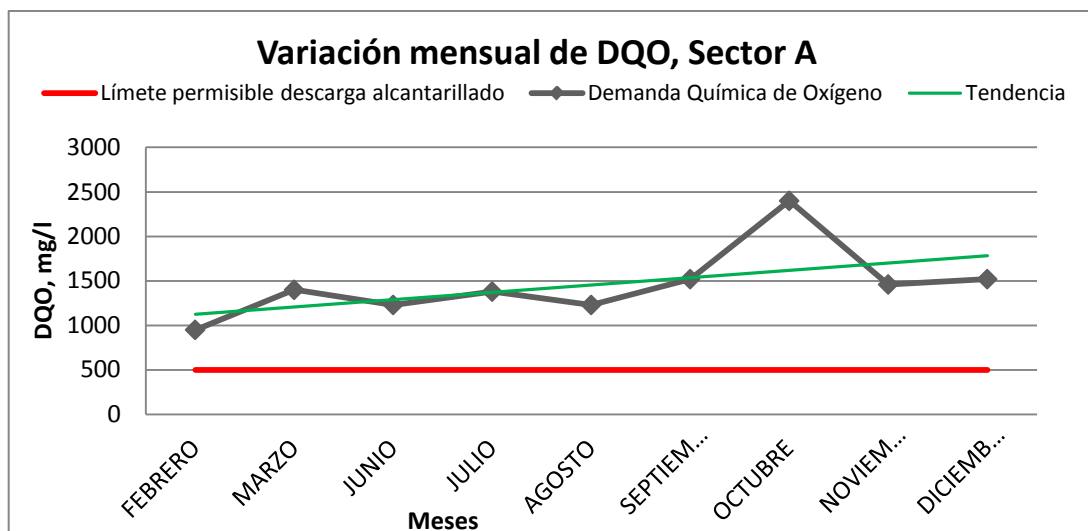
**Gráfica 15. Variación mensual de Residuos suspendidos, Sector D**



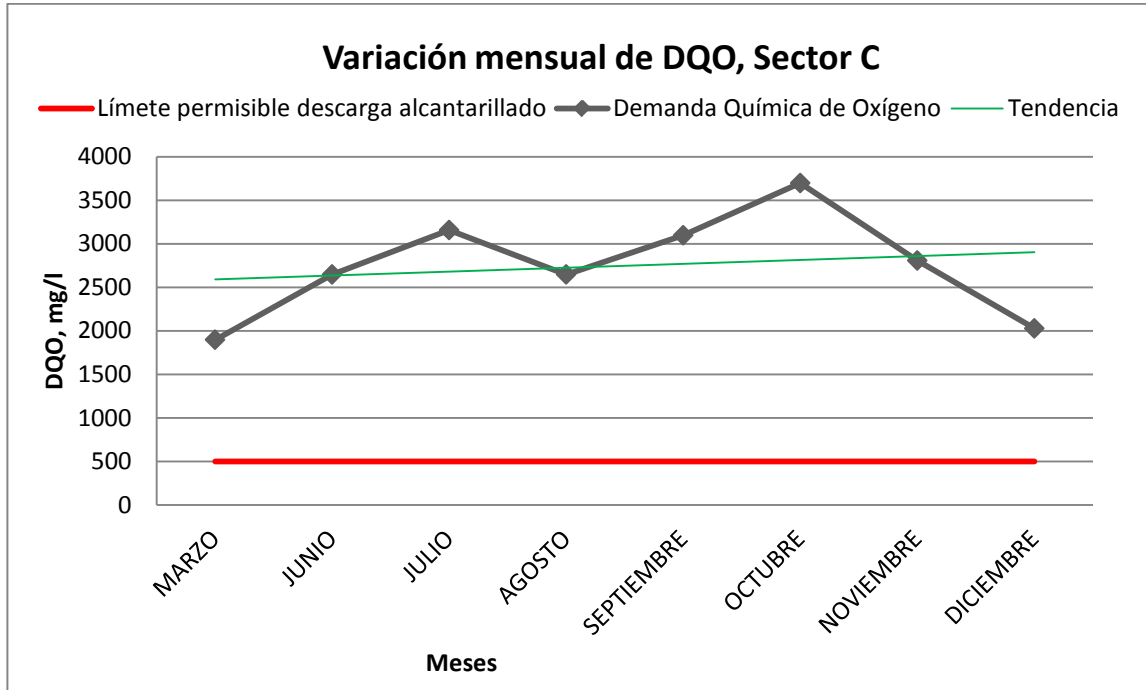
Fuente:Elaboración propia

**DQO.-** La demanda química de oxígeno corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible de oxidación al dicromato o pergamandato, en medio ácido.

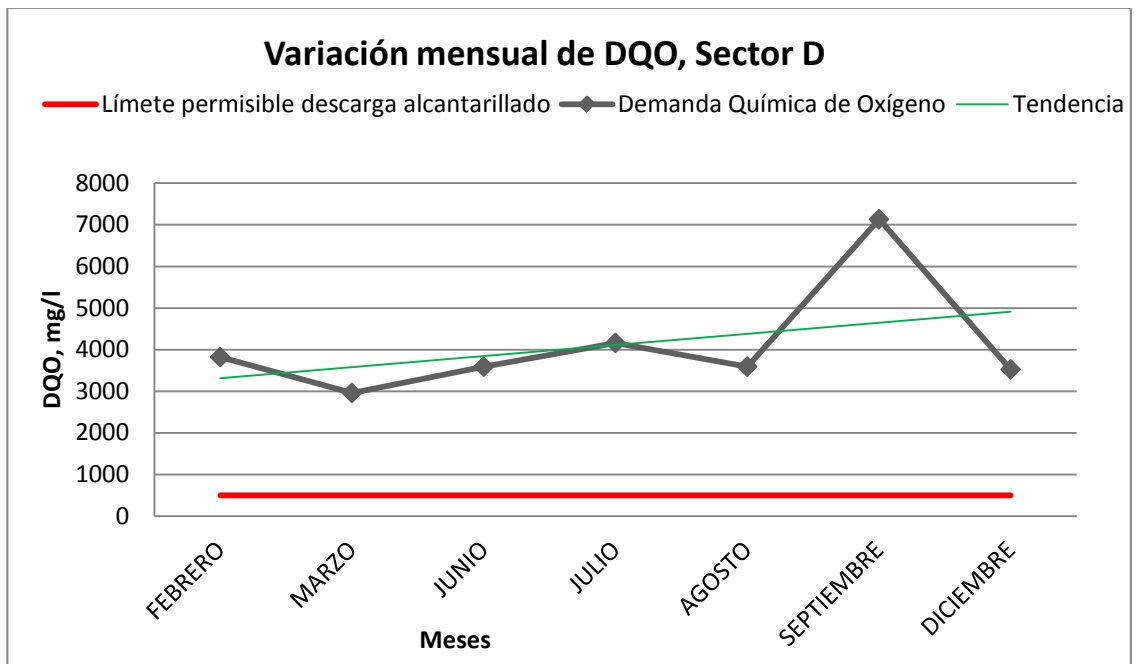
**Gráfica 16. Variación mensual de DQO, Sector A**



**Gráfica 17. Variación mensual de DQO, Sector C**

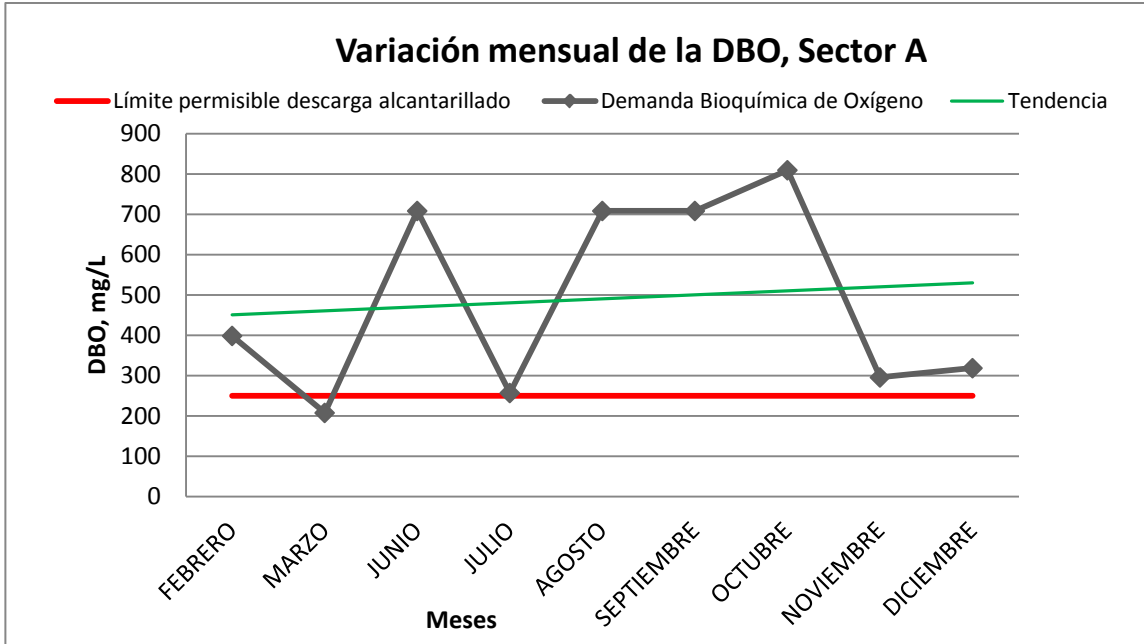


**Gráfica 18. Variación mensual de DQO, Sector D**

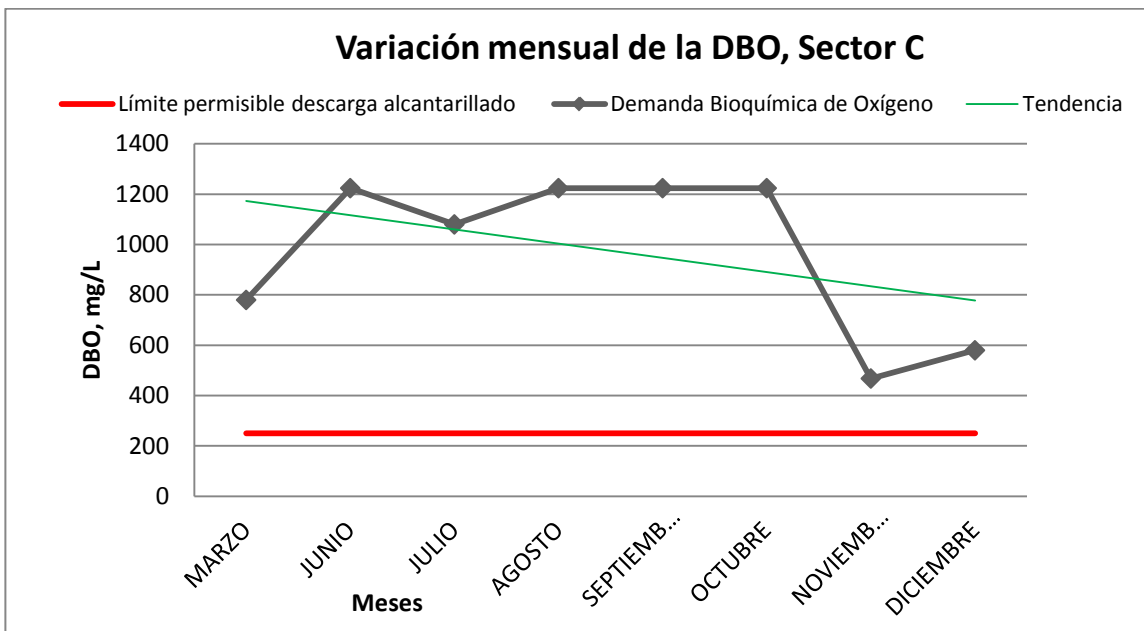


Fuente:Elaboración propia

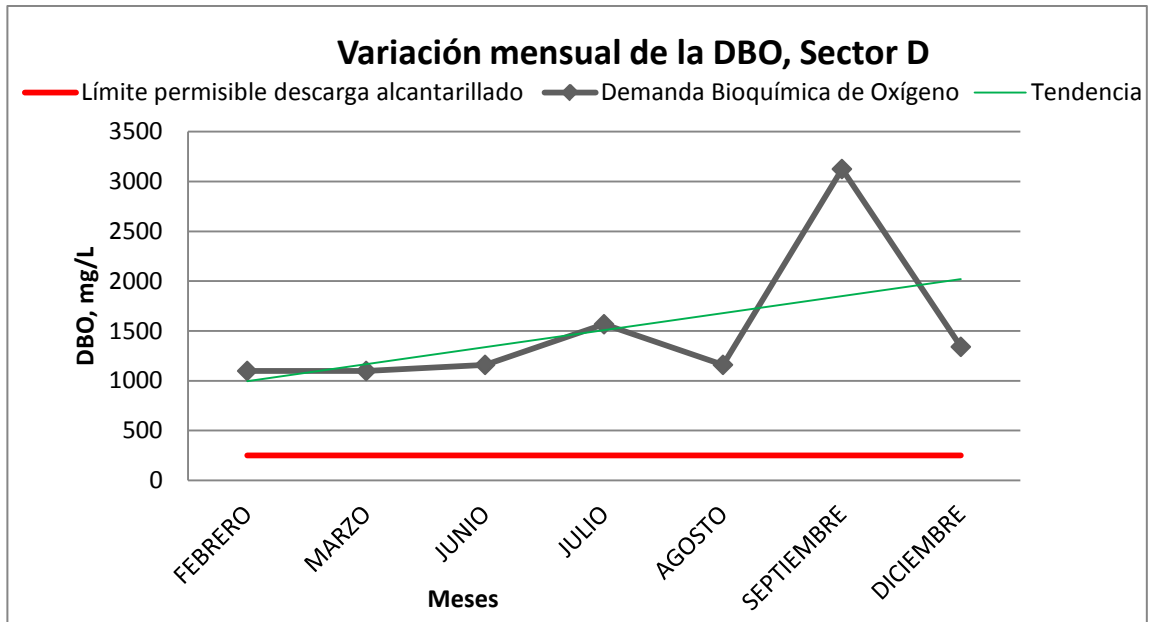
**Gráfica 19. Variación mensual de la DBO, Sector A**



**Gráfica 20. Variación mensual de la DBO, Sector C**

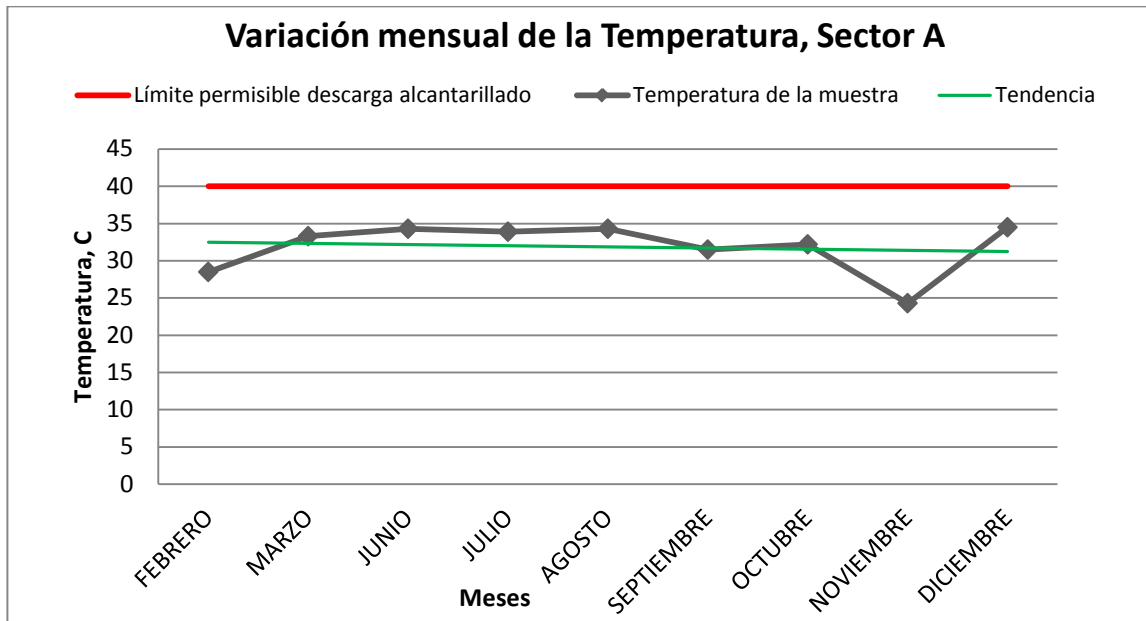


**Gráfica 21. Variación mensual de la DBO, Sector D**

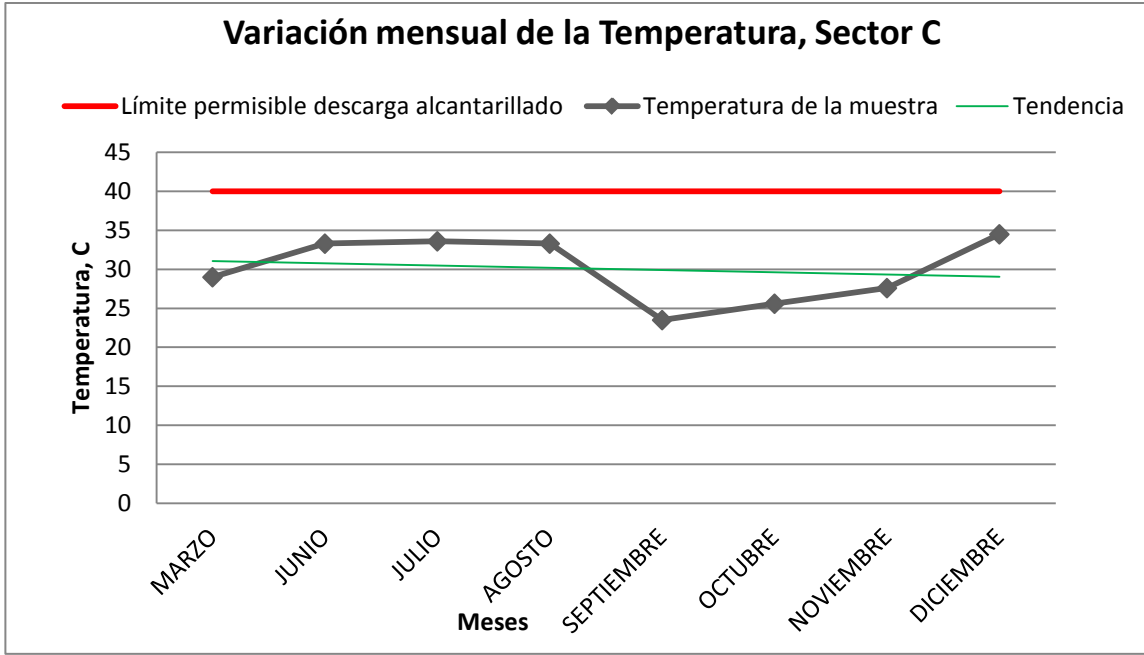


*Fuente:Elaboración propia*

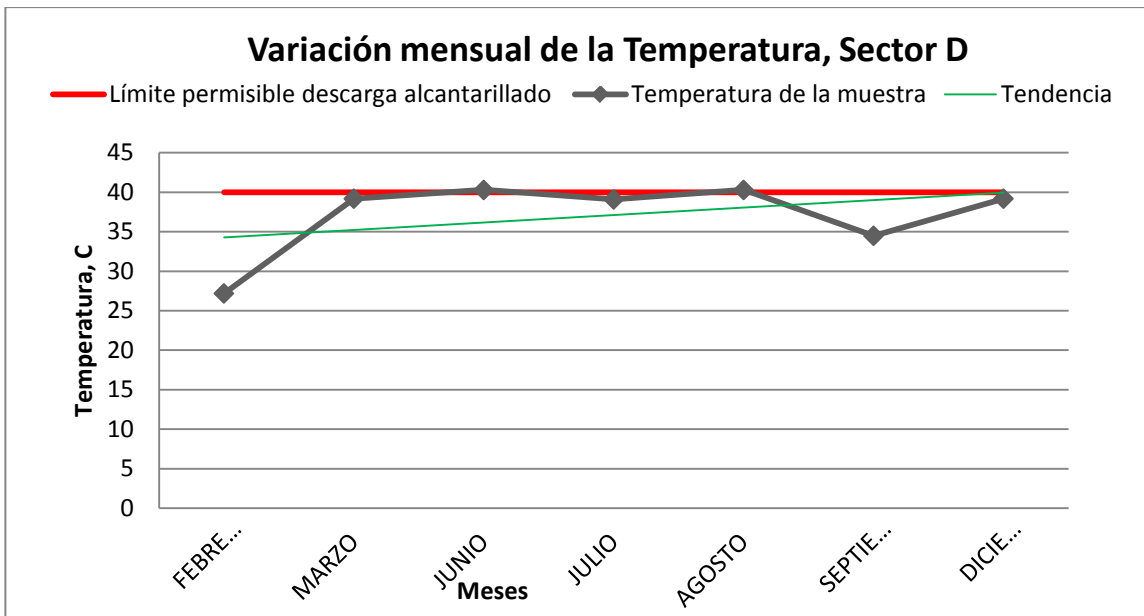
**Gráfica 22. Variación mensual de la Temperatura, Sector A**



**Gráfica 23. Variación mensual de la Temperatura, Sector C**

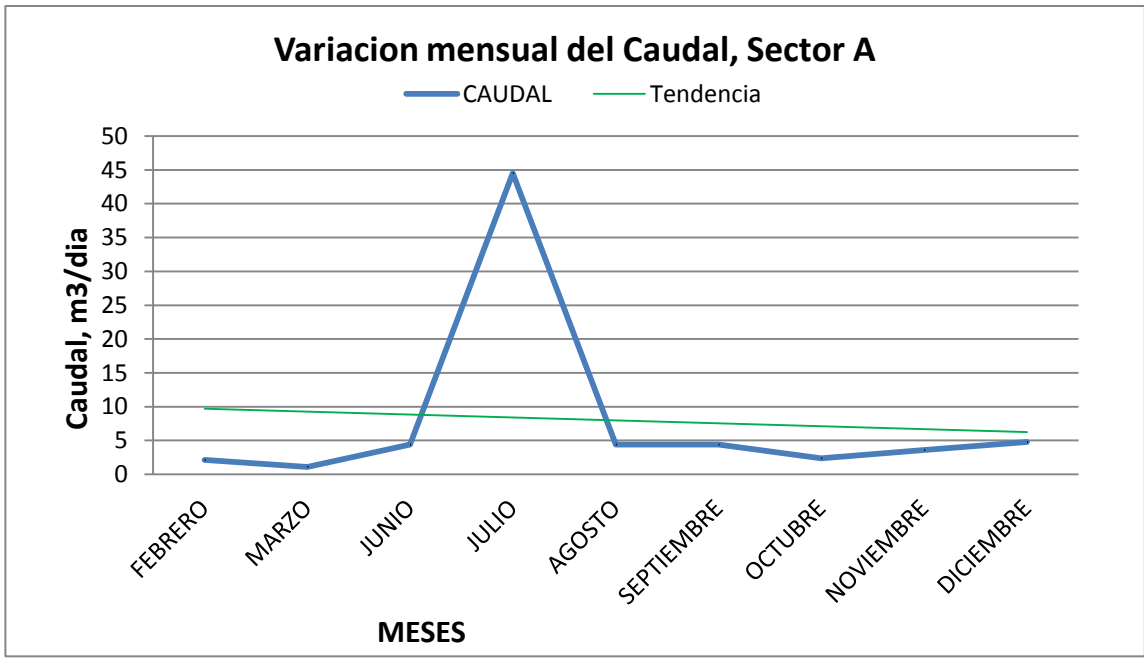


**Gráfica 24. Variación mensual de la Temperatura, Sector D**

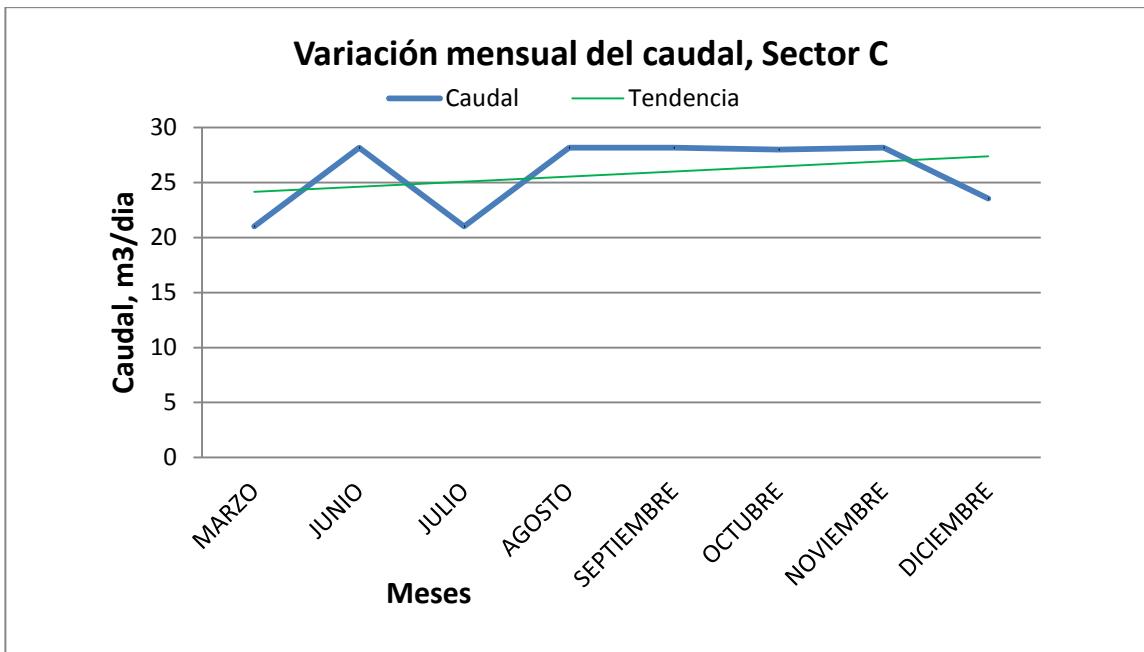


Fuente:Elaboración propia

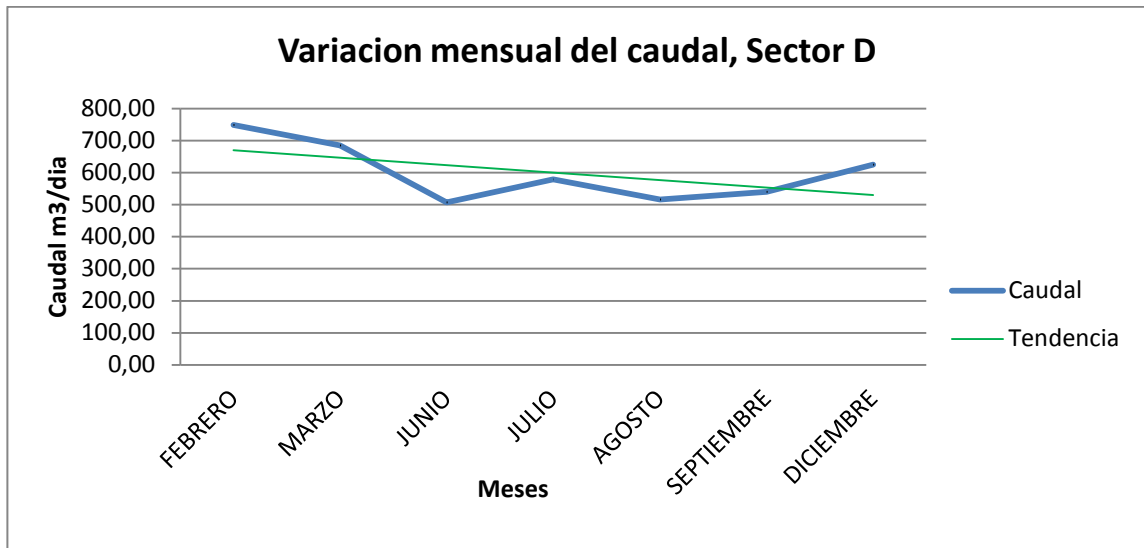
**Gráfica 25. Variación mensual de Caudal, Sector A**



**Gráfica 26. Variación mensual de Caudal, Sector C**



**Gráfica 27. Variación mensual de Caudal, Sector D**



*Fuente:Elaboración propia*

**Dureza.-** Las aguas duras son aquellas que requieren considerable cantidad de jabón para producir espuma y por todos es conocido que producen incrustaciones en las tuberías, principalmente en calderas, calentadores, etc. Al exceso de dureza se le denomina dureza de no carbonatos. La dureza de carbonatos se precipita al hervir el agua y se puede renovar.

No existe límites de dureza para descarga del alcantarillado; sin embargo, existen restricciones en su uso por las posibles incrustaciones en las tuberías.

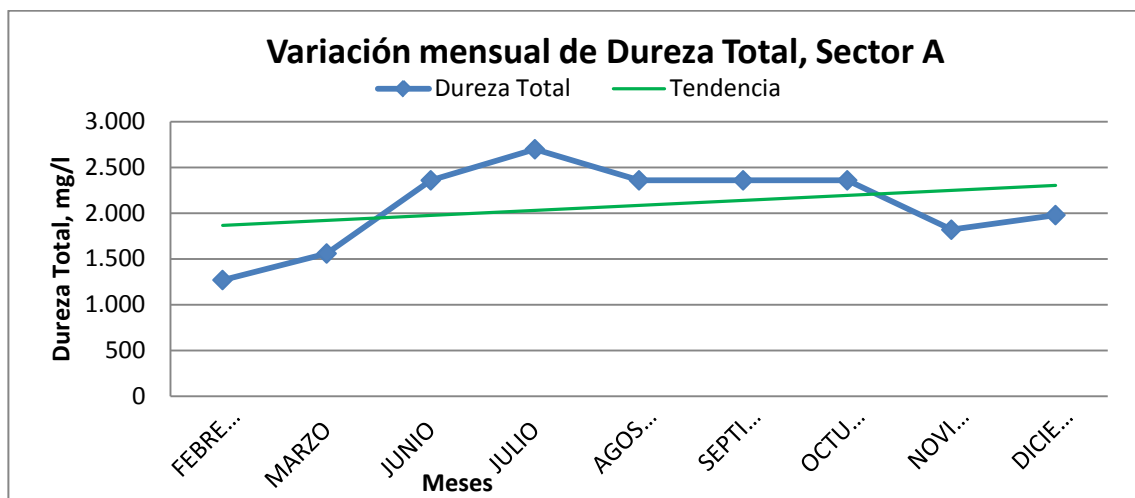
La percepción pública de la dureza en un cuerpo de agua depende de experiencias individuales de cada persona, sin embargo una dureza superior a 150 mg/L (Ca O<sub>3</sub>) es percibido por la mayoría de las personas.

En la *Tabla 33* tenemos que de acuerdo a la dureza, las aguas pueden ser:

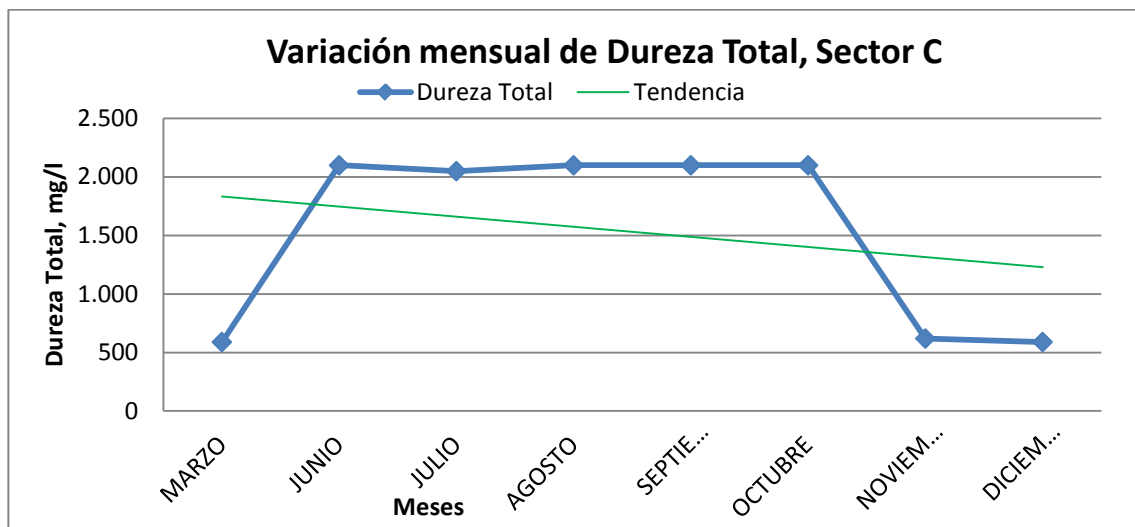
**Tabla 33. Clasificación del agua de acuerdo a la dureza**

Descripción	M2q/l	mg/l as CaO3
Suave	<1	<50
Moderadamente Dura	1-3	50-150
Dura	3-6	150-300
Muy Dura	>6	>300

**Gráfica 28. Variación mensual de Dureza Total, Sector A**

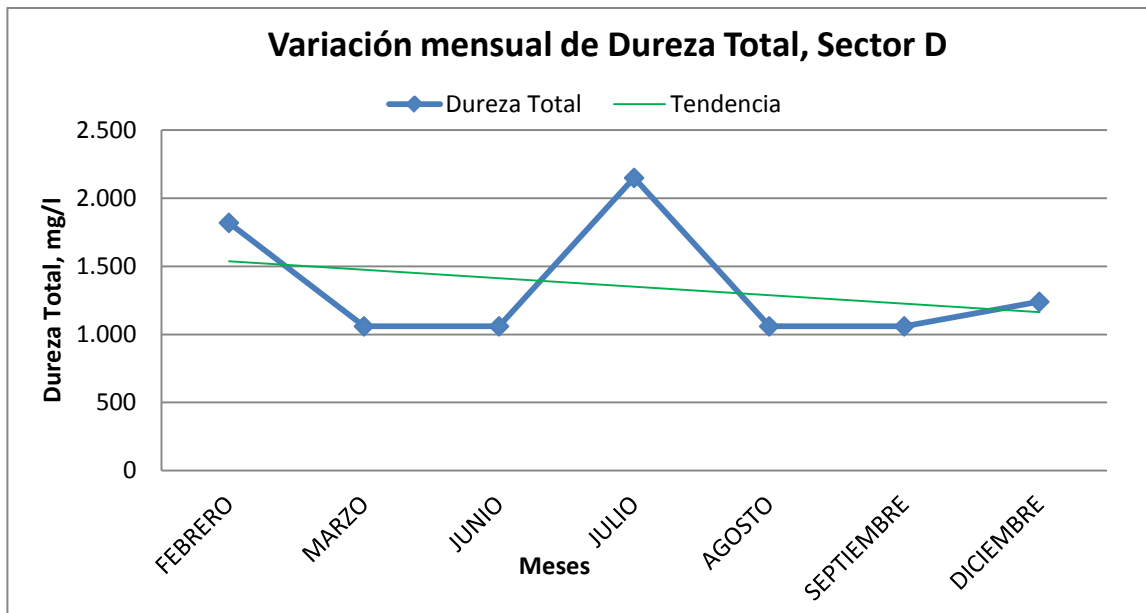


**Gráfica 29. Variación mensual de Dureza Total, Sector C**

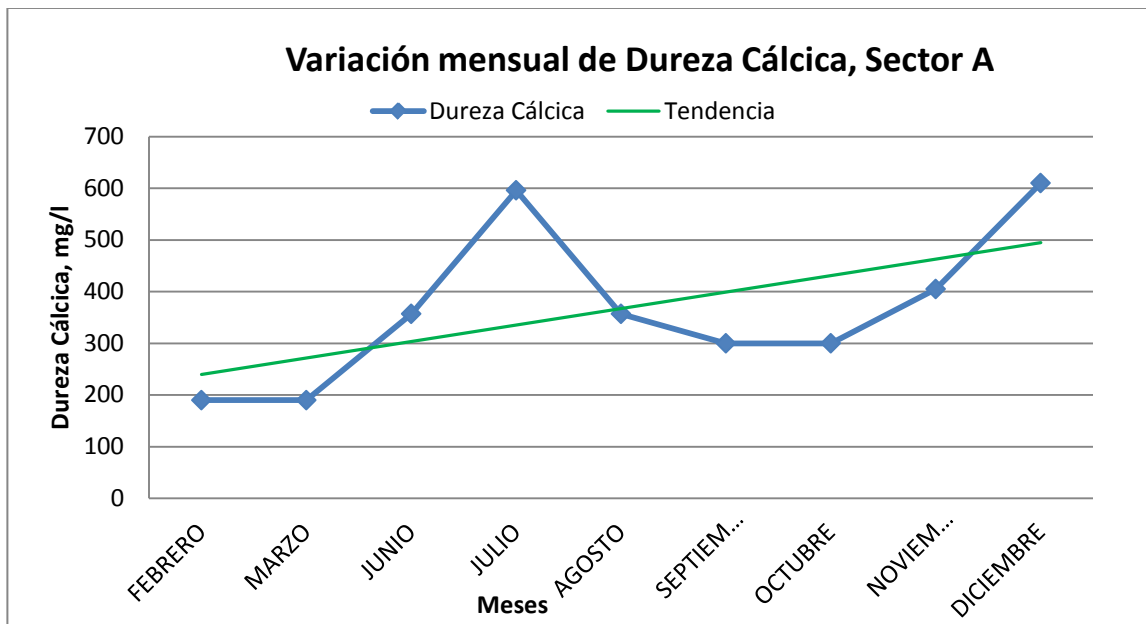




**Gráfica 30. Variación mensual de Dureza Total, Sector D**

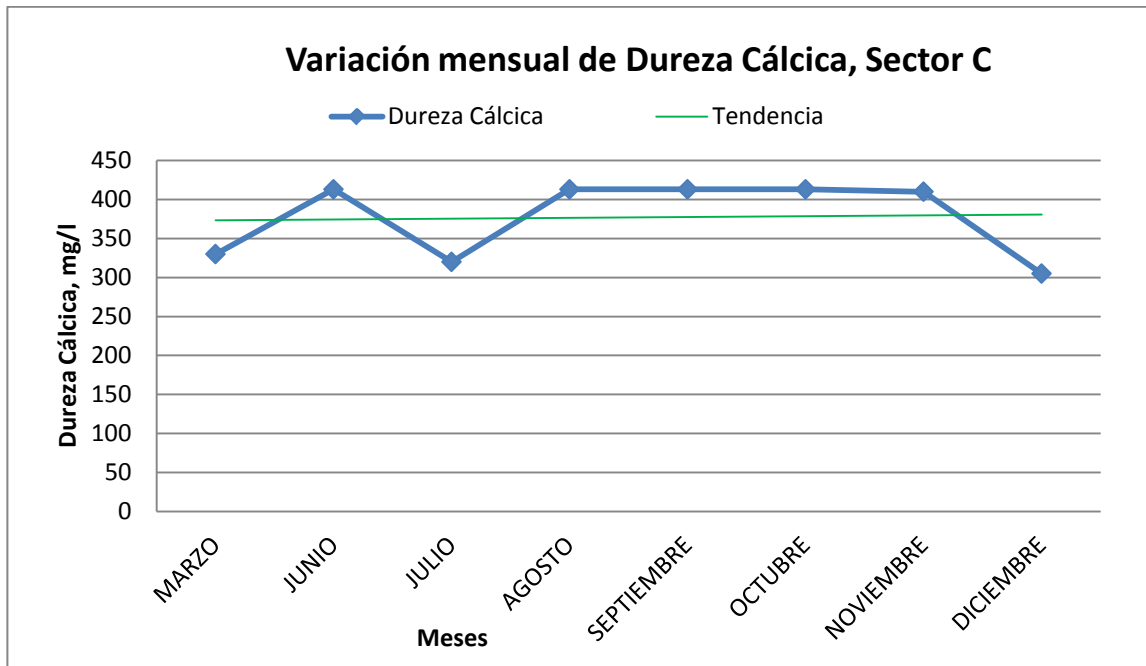


**Gráfica 31. Variación mensual de Dureza Cálctica, Sector A**

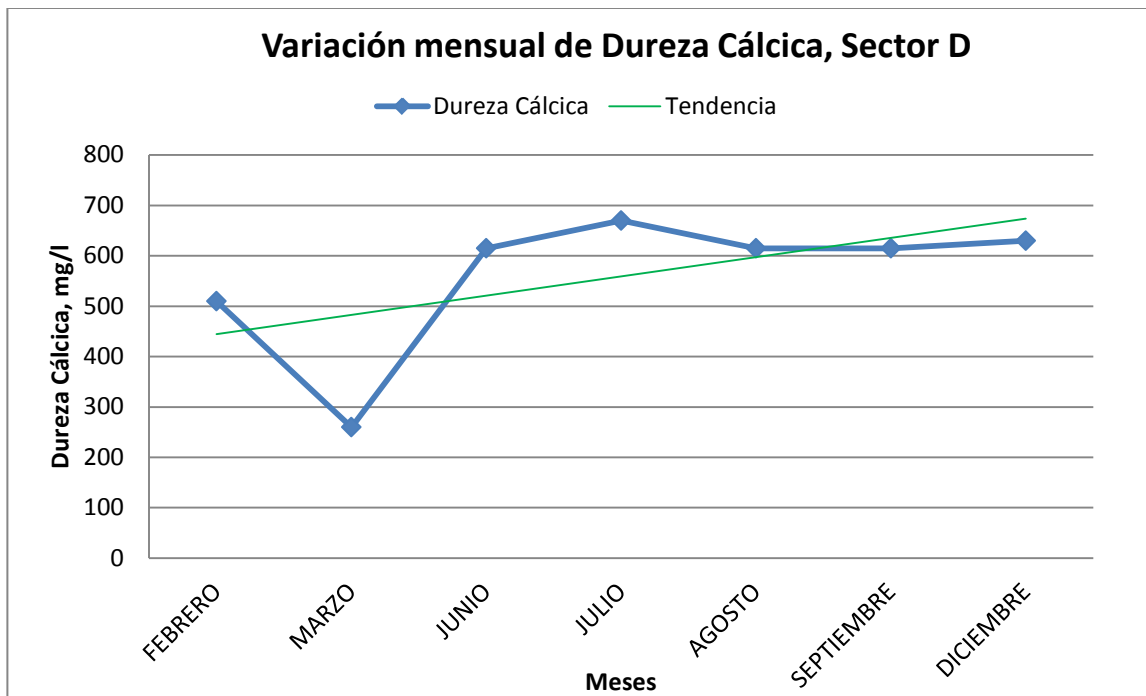


Fuente:Elaboración propia

**Gráfica 32. Variación mensual de Dureza Cálctica, Sector C**

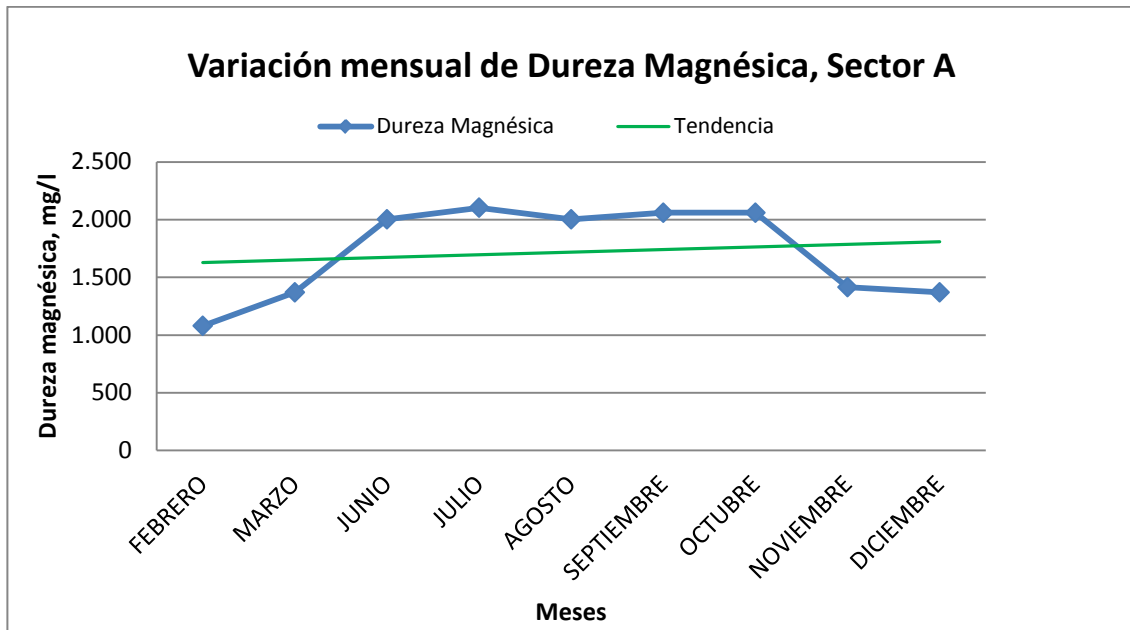


**Gráfica 33. Variación mensual de Dureza Cálctica, Sector D**

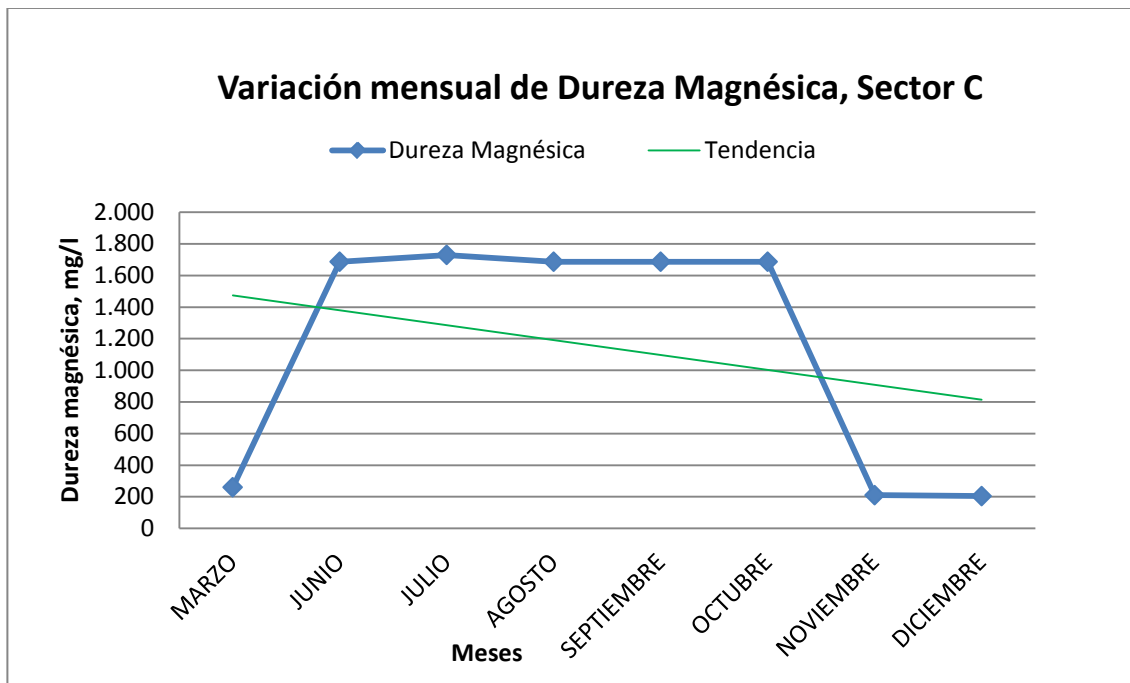


*Fuente:Elaboración propia*

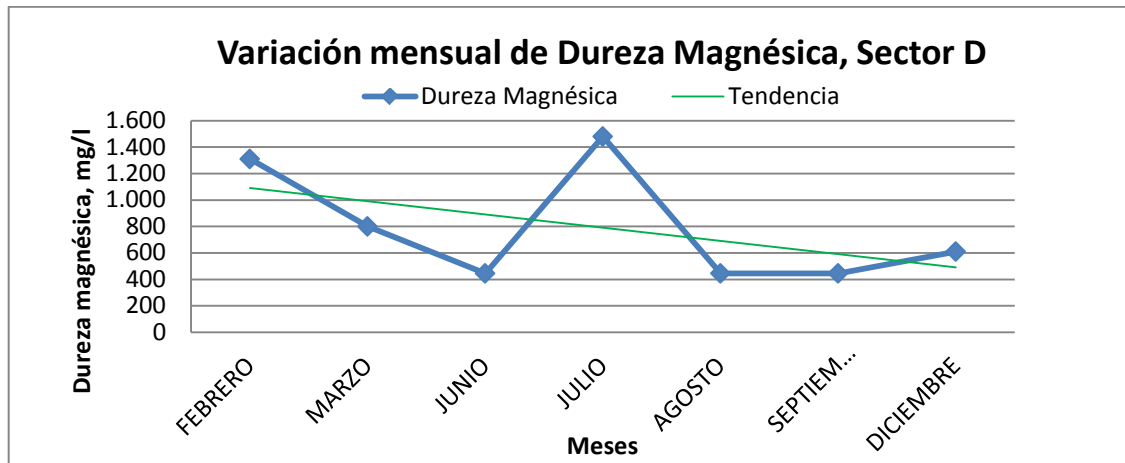
**Gráfica 34. Variación mensual de Dureza magnésica, Sector A**



**Gráfica 35. Variación mensual de Dureza magnésica, Sector C**



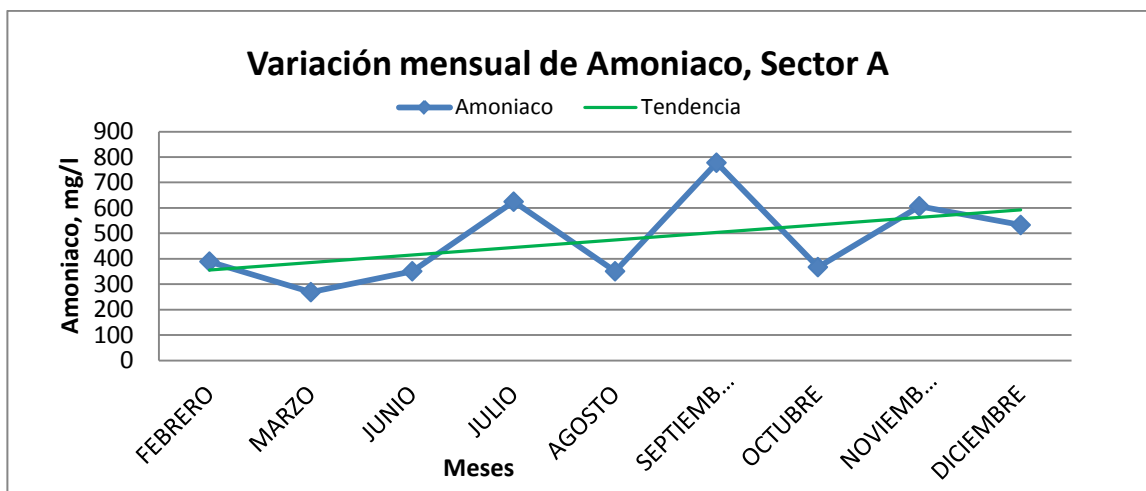
**Gráfica 36. Variación mensual de Dureza magnésica, Sector D**



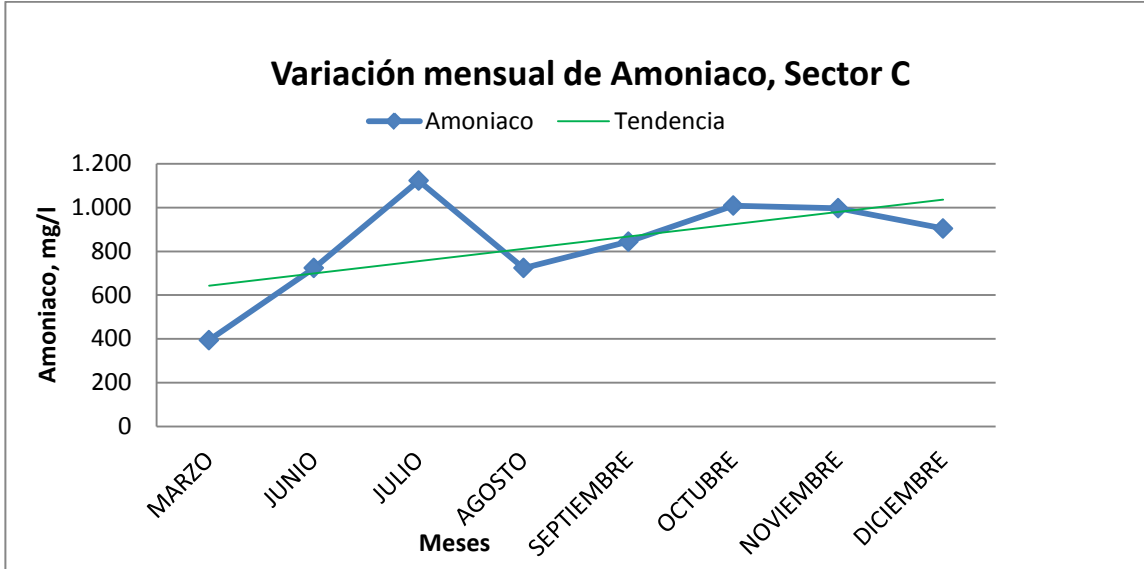
*Fuente:Elaboración propia*

**Amoniaco.-** Si bien no existe un límite permisible de descarga al alcantarilado, pero el amoniaco si tiene efecto tóxico sobre la vida acuática; por eso, nos hacemos referencia al Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente: Libro VI- Anexo I- Tabla 3 donde los Criterios de Calidad admisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces, frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuario, el amonio se encuentra en 0.04 mg/l para agua marina y estuario. A nivel internacional la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos a establecido regulaciones en el mismo sentido.

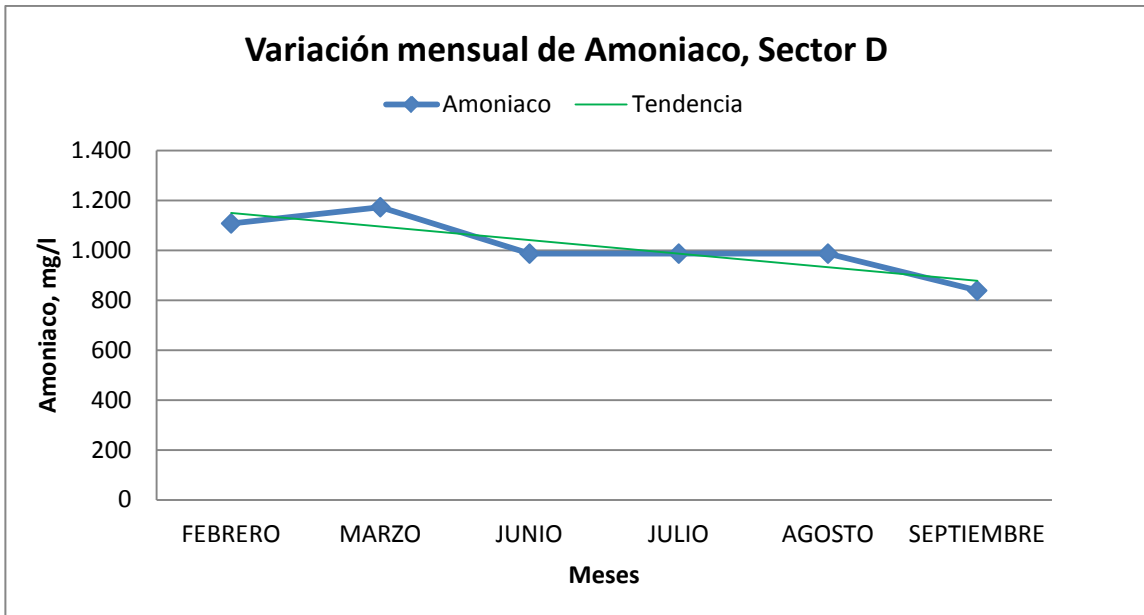
**Gráfica 37. Variación mensual de Amoniaco, Sector A.**



**Gráfica 38. Variación mensual de Amoniaco, Sector C**



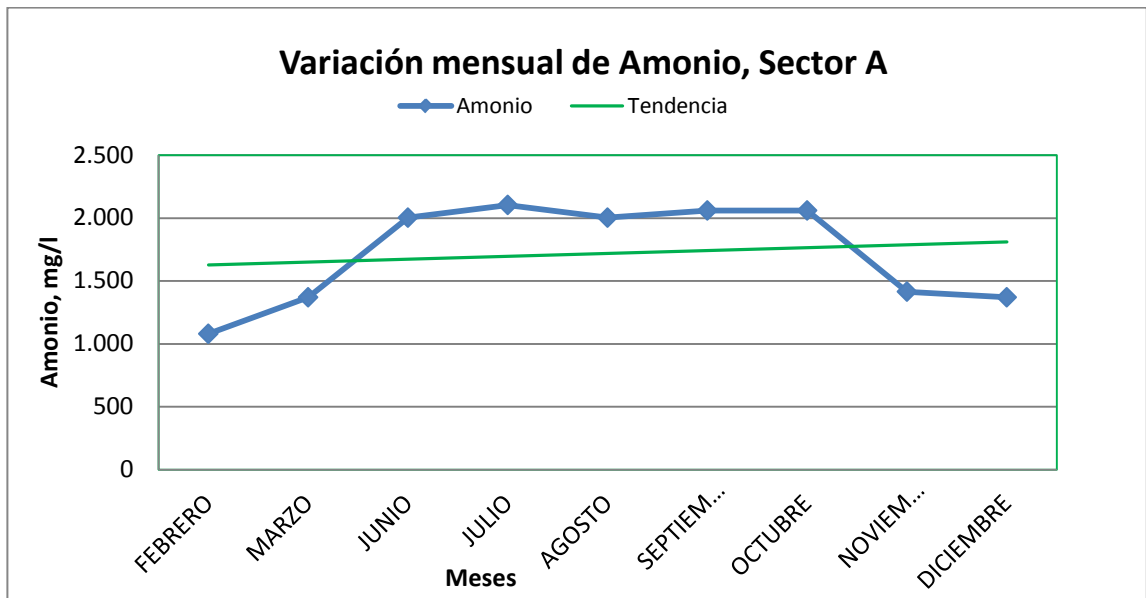
**Gráfica 39. Variación mensual de Amoniaco, Sector D.**



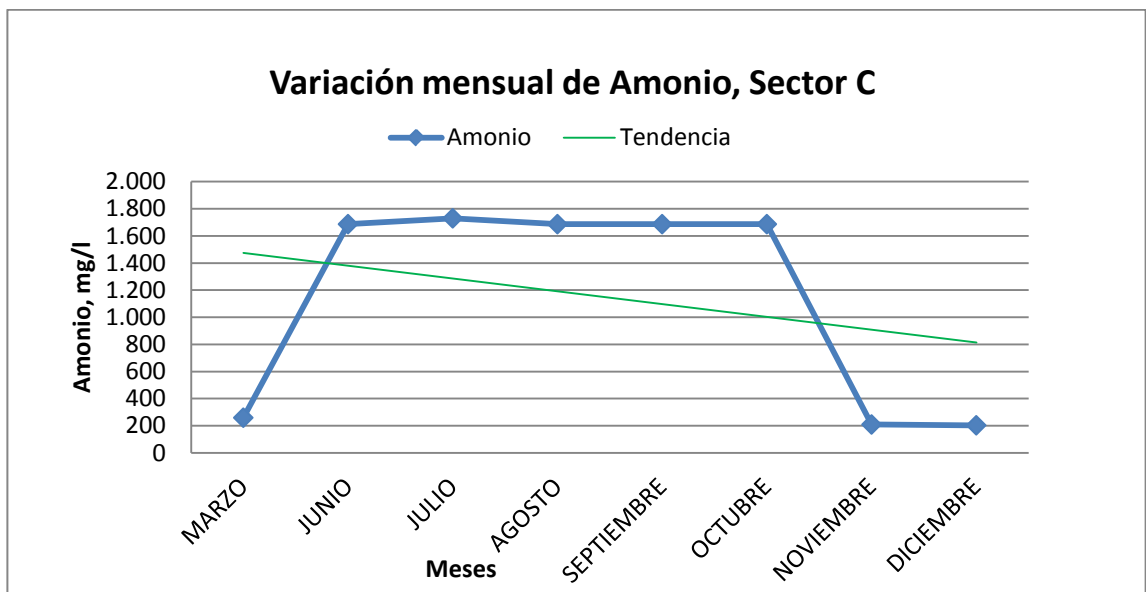
*Fuente:Elaboración propia*

**Amonio.-** Es un parámetro usado para evaluar la contaminación en aguas subterráneas, siendo tomado como un indicativo de vulnerabilidad y sin embargo, no existe límites para descarga al alcantarillado.

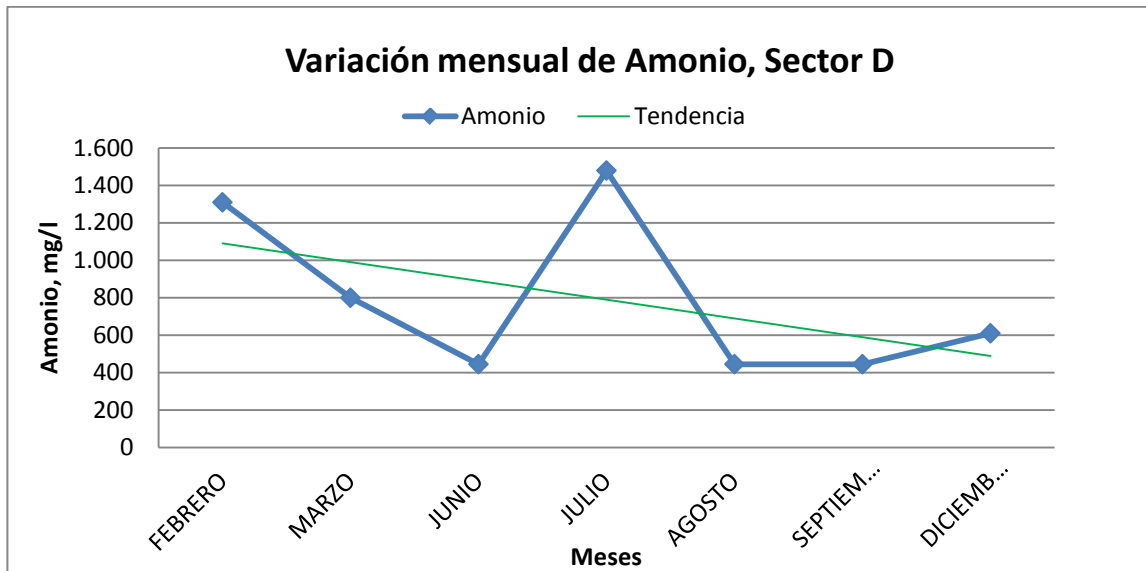
**Gráfica 40. Variación mensual de Amonio, Sector A**



**Gráfica 41. Variación mensual de Amonio, Sector C**



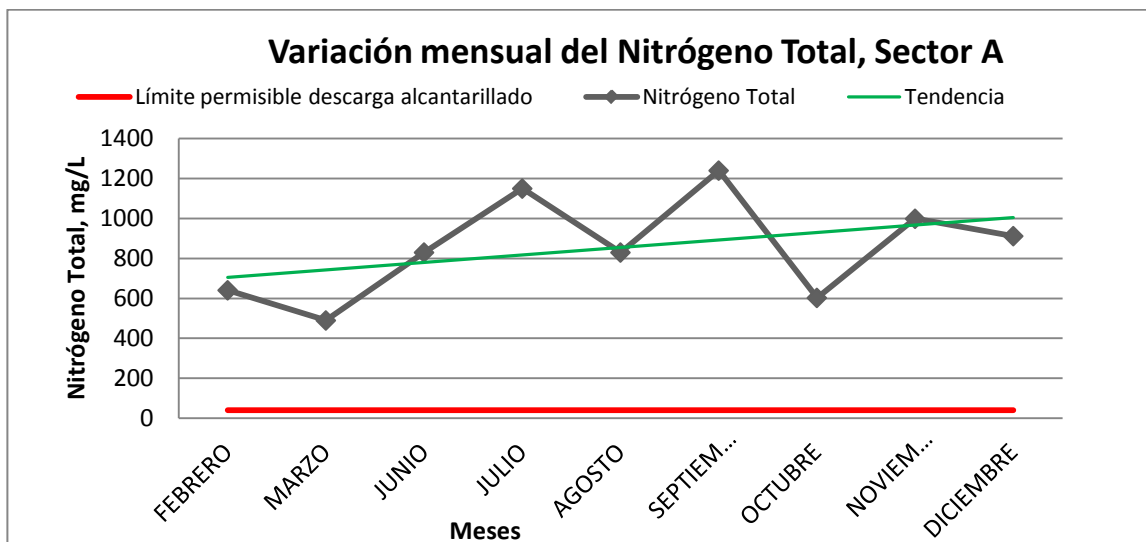
**Gráfica 42. Variación mensual de Amonio, Sector D**



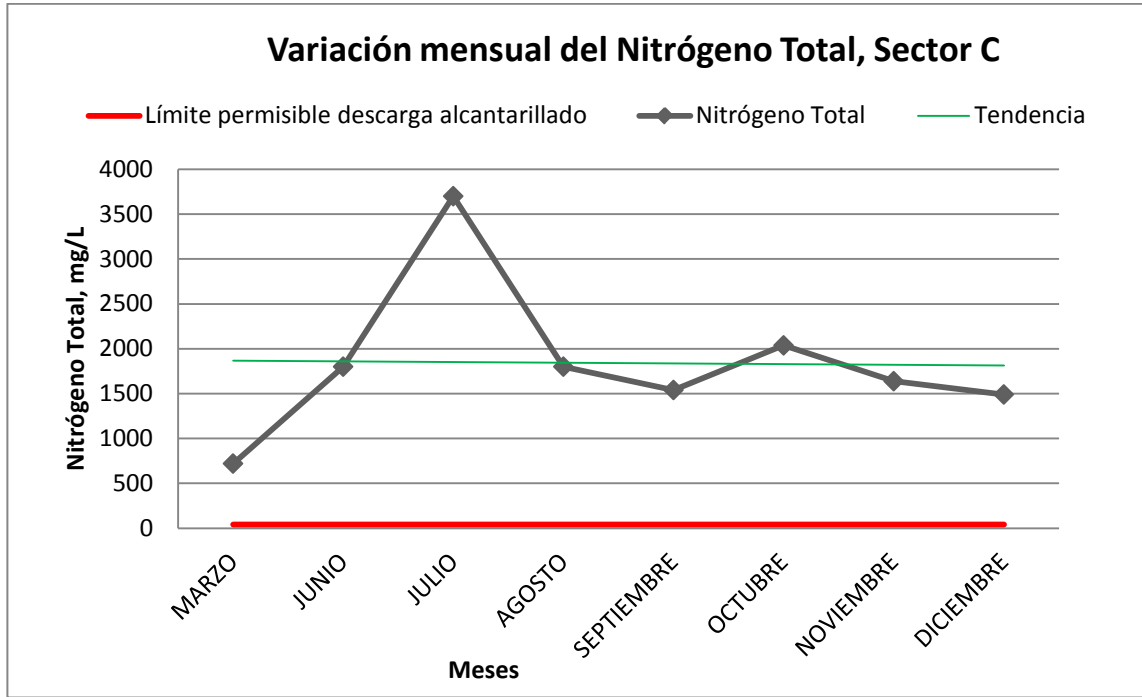
*Fuente:Elaboración propia*

**Nitrógeno total.-** Es la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal, pueden analizarse juntos y son determinados como el nitrógeno Kjeldahl, término que hace referencia a la técnica usada en su determinación. La forma más oxidada del nitrógeno son los nitratos (el más estable). Es necesario controlar los niveles de nitrógeno para evitar eutrofización.

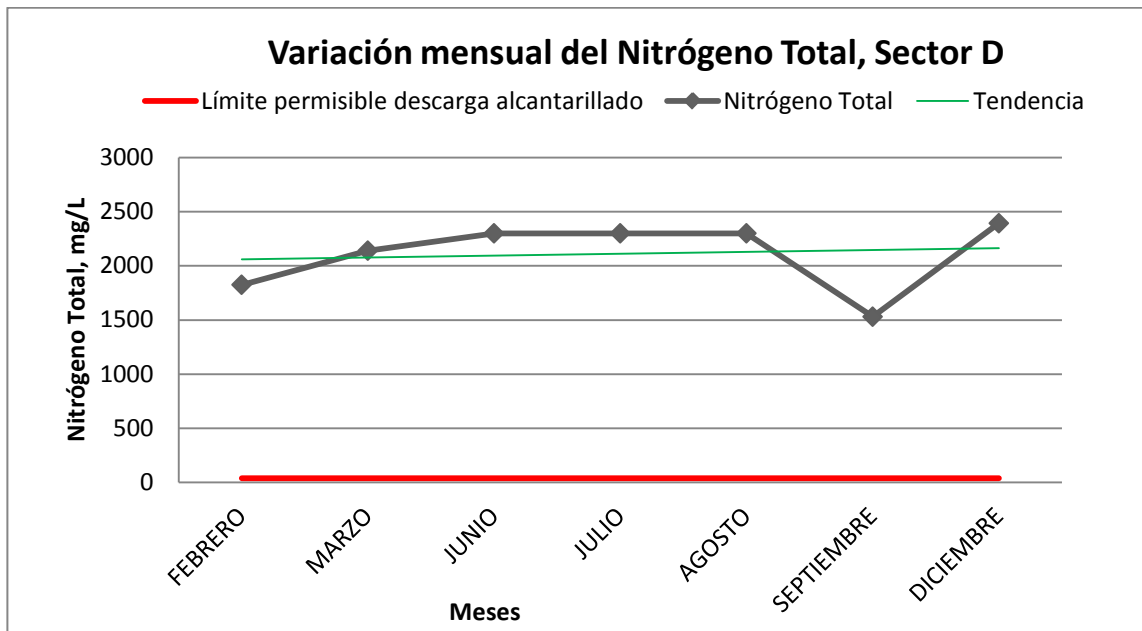
**Gráfica 43. Variación mensual del Nitrógeno Total, Sector A**



**Gráfica 44. Variación mensual del Nitrógeno Total, Sector C**



**Gráfica 45. Variación mensual del Nitrógeno Total, Sector D**

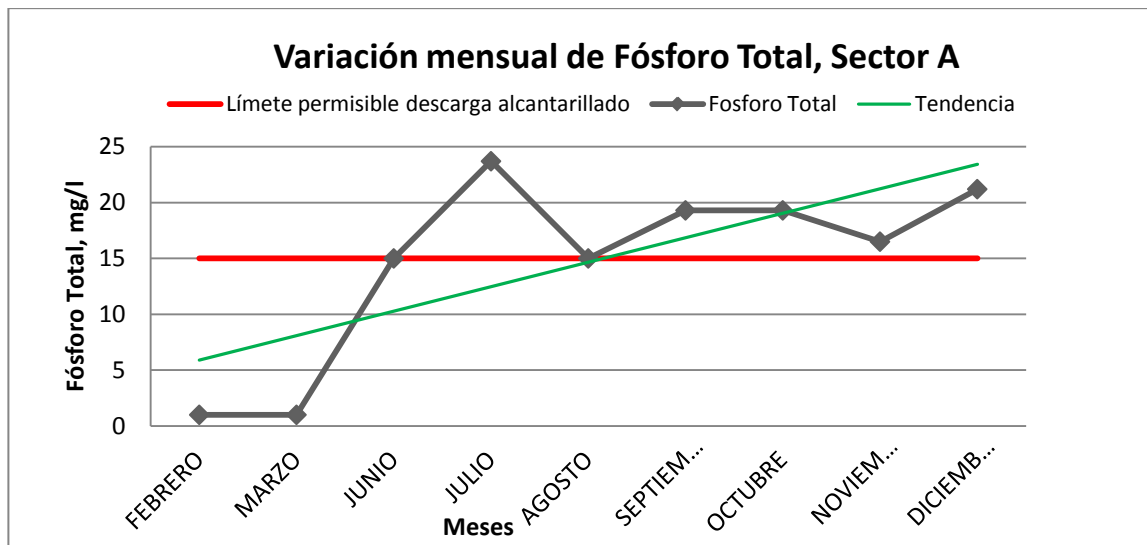


*Fuente:Elaboración propia*

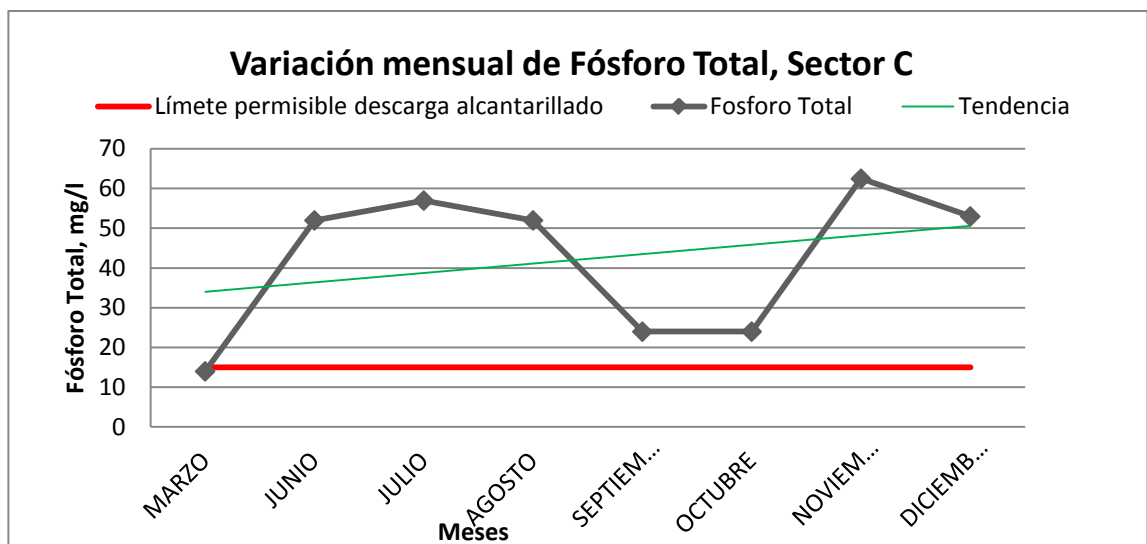


**El fósforo.-** Se encuentra en las aguas naturales y residuales solo como fosfato. Las formas de fosfatos tienen variedad de oxígeno. Pequeñas cantidades de fosfatos condensados son usadas en lavanderías y otras limpiezas, porque estos materiales son los mejores constituyentes de muchos limpiadores comerciales, los ortofosfatos son aplicados a la agricultura como fertilizantes, los fosfatos orgánicos son formados en procesos biológicos.

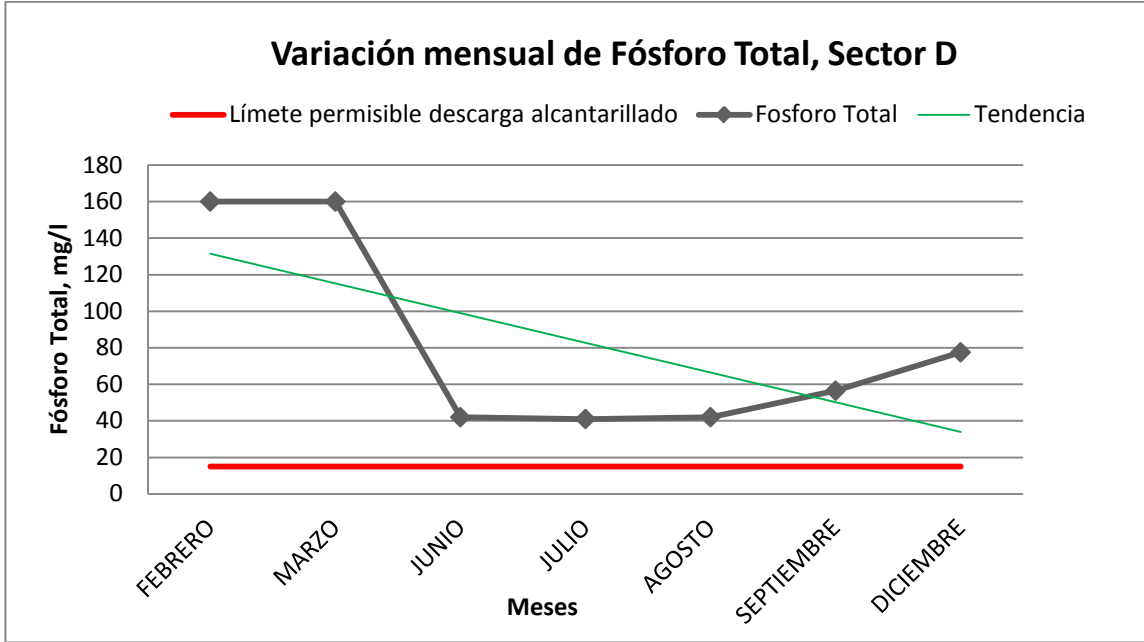
**Gráfica 46. Variación mensual de Fósforo Total, Sector A**



**Gráfica 47. Variación mensual de Fósforo total, Sector C**

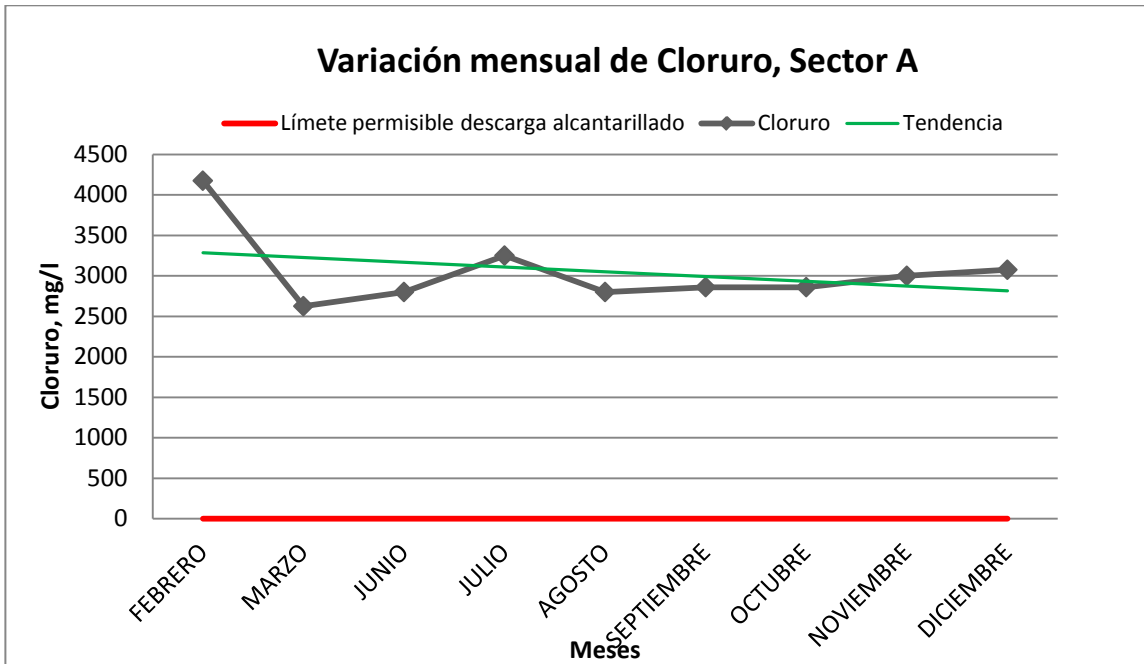


**Gráfica 48. Variación mensual de Fósforo total, Sector D**

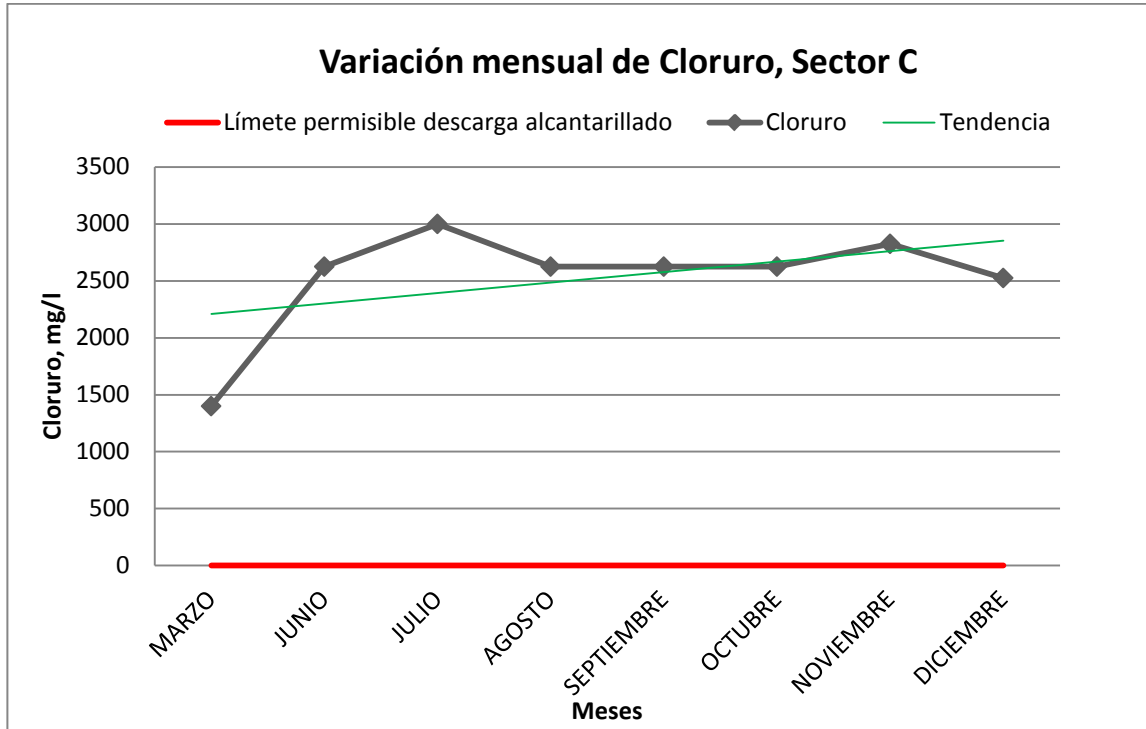


Fuente:Elaboración propia

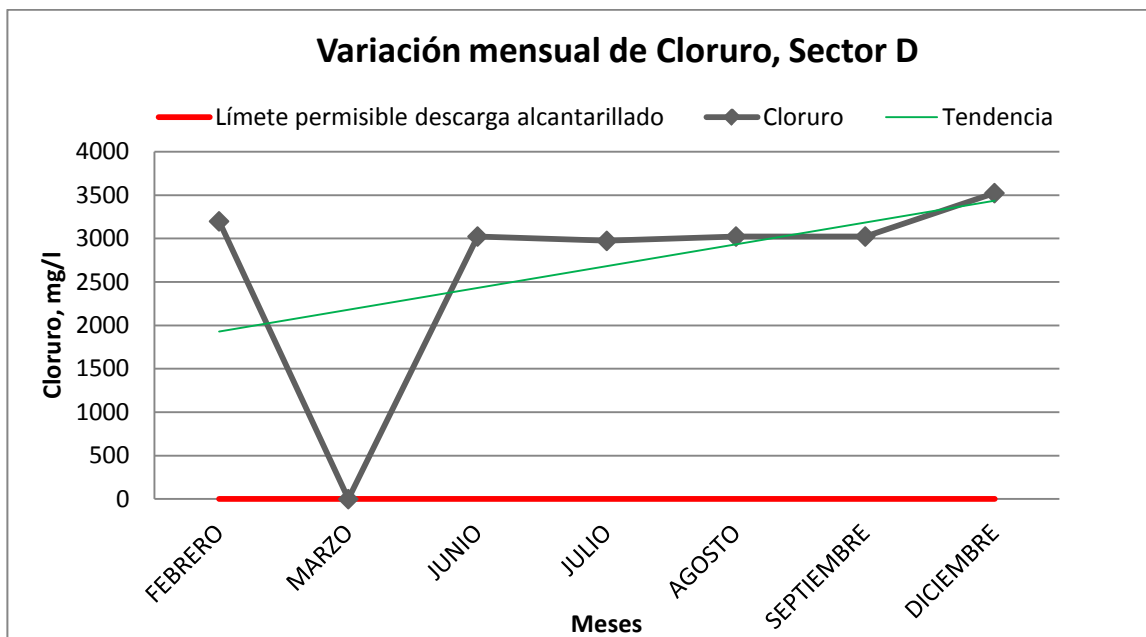
**Gráfica 49. Variación mensual de Cloruro, Sector A**



**Gráfica 50. Variación mensual de cloruro, Sector C**

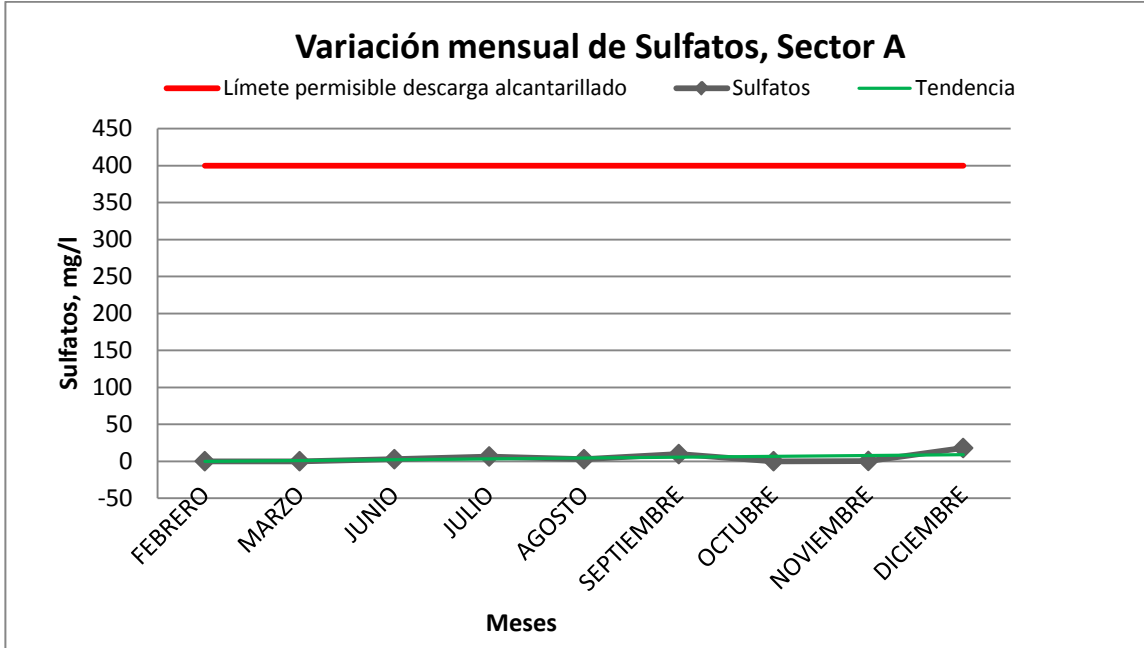


**Gráfica 51. Variación mensual de cloruro, Sector D**

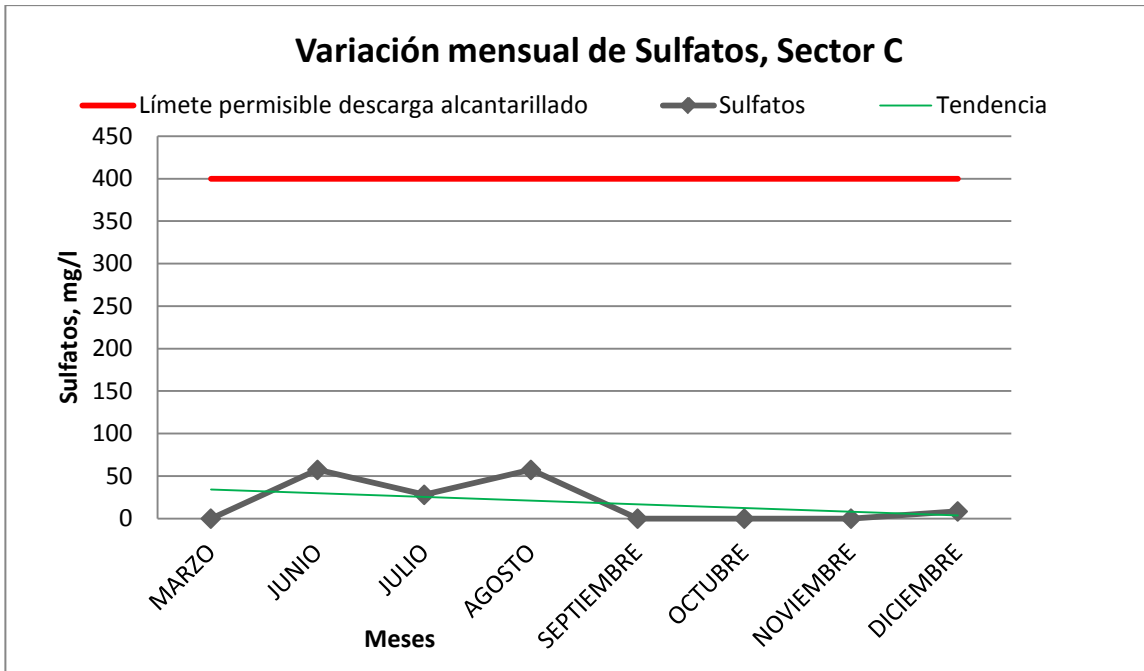


Fuente:Elaboración propia

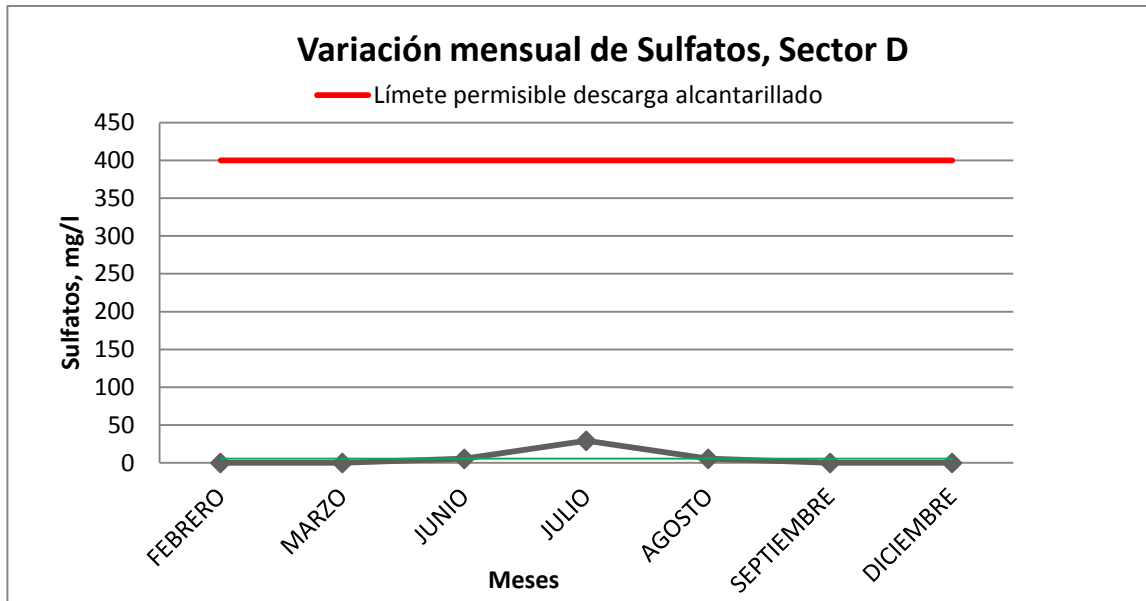
Gráfica 52. Variación mensual de Sulfatos, Sector A



Gráfica 53. Variación mensual de Sulfatos, Sector C

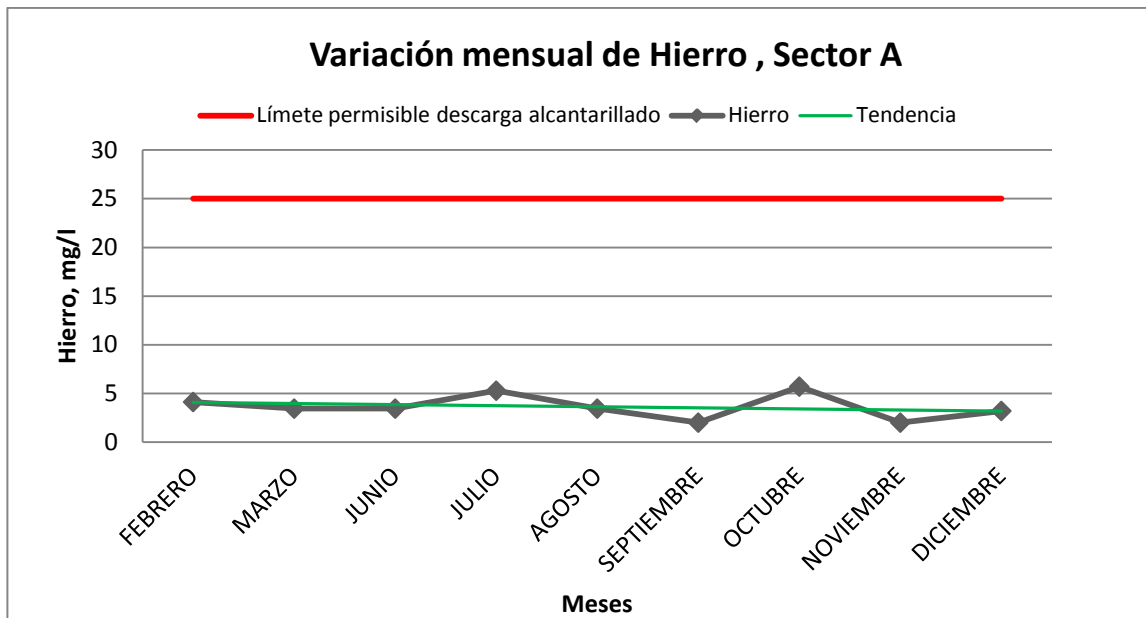


Gráfica 54. Variación mensual de Sulfatos, Sector D

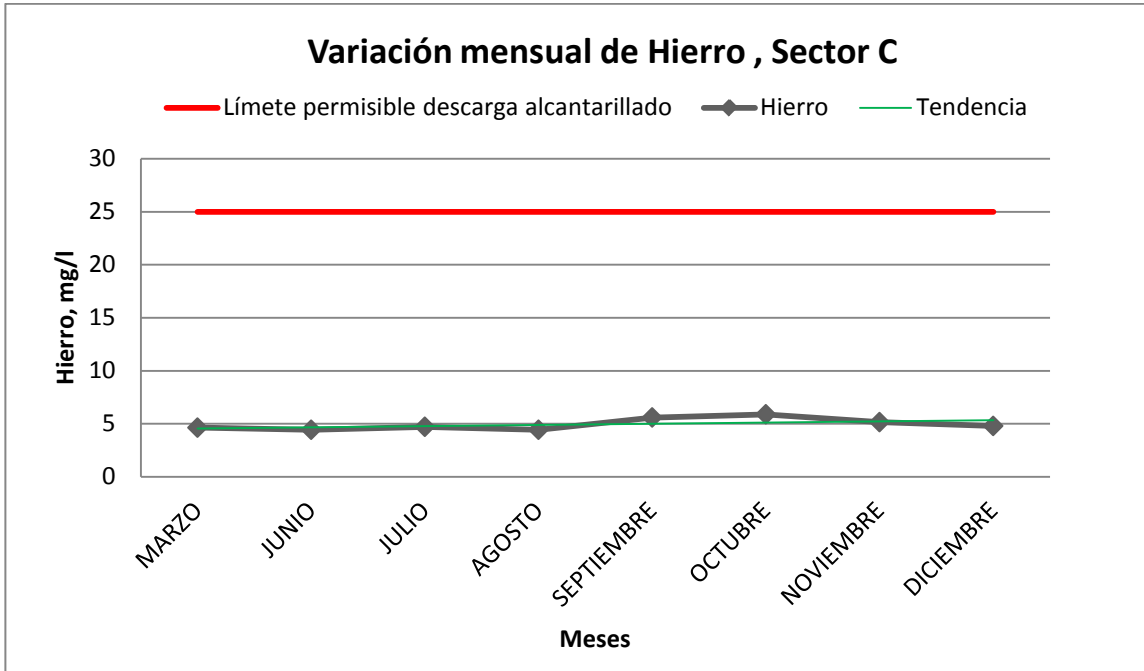


Fuente:Elaboración propia

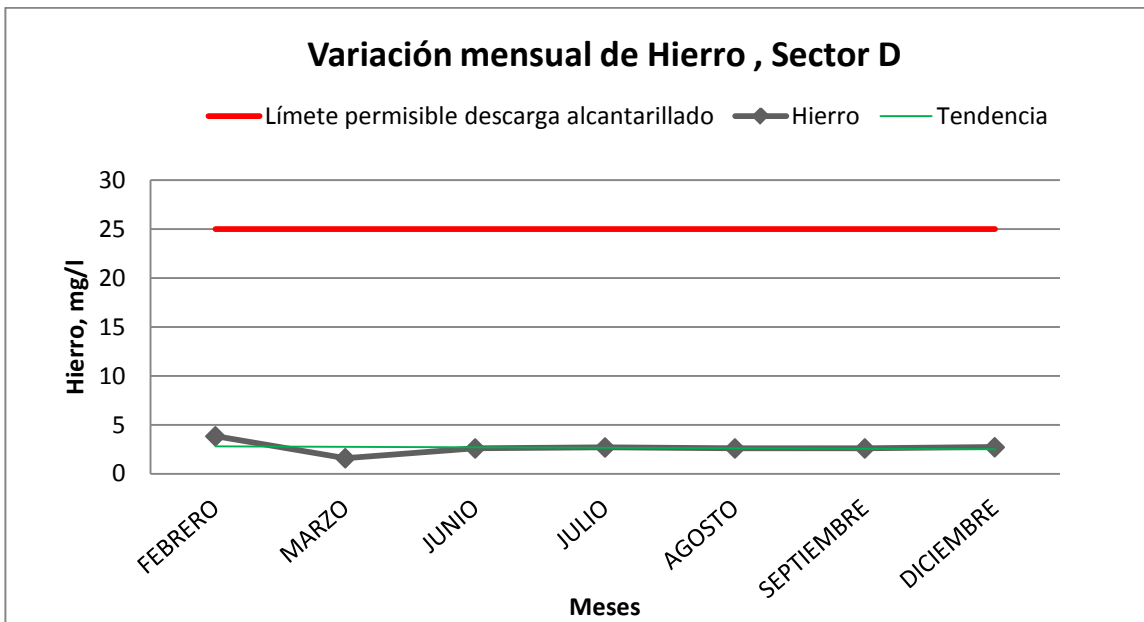
Gráfica 55. Variación mensual de Hierro, Sector A



**Gráfica 56. Variación mensual de Hierro, Sector C**

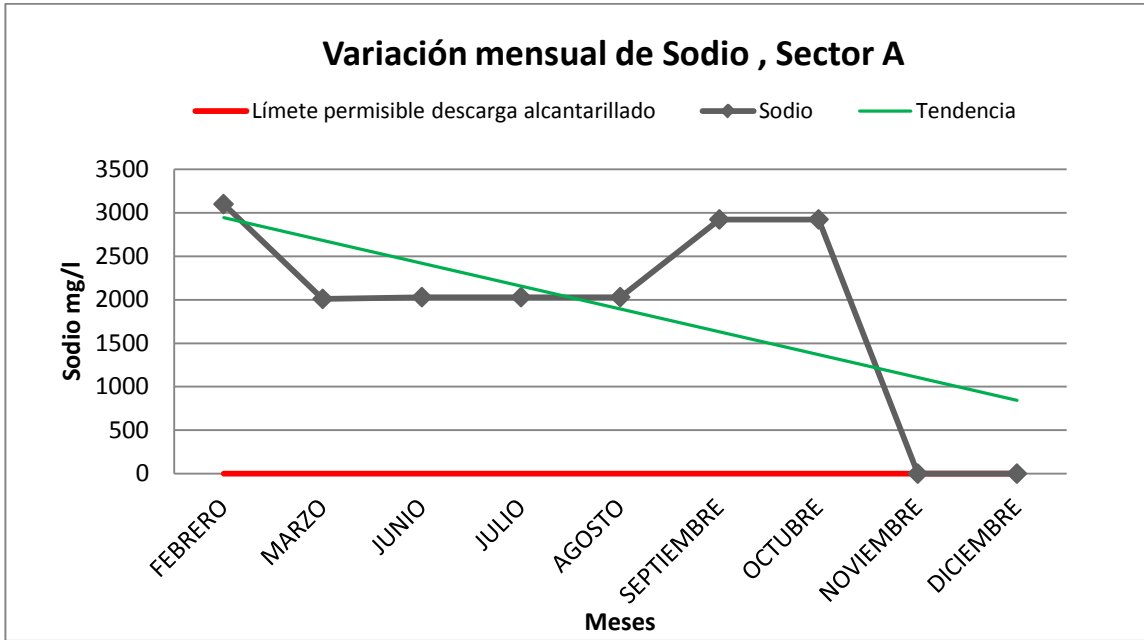


**Gráfica 57. Variación mensual de Hierro, Sector D**

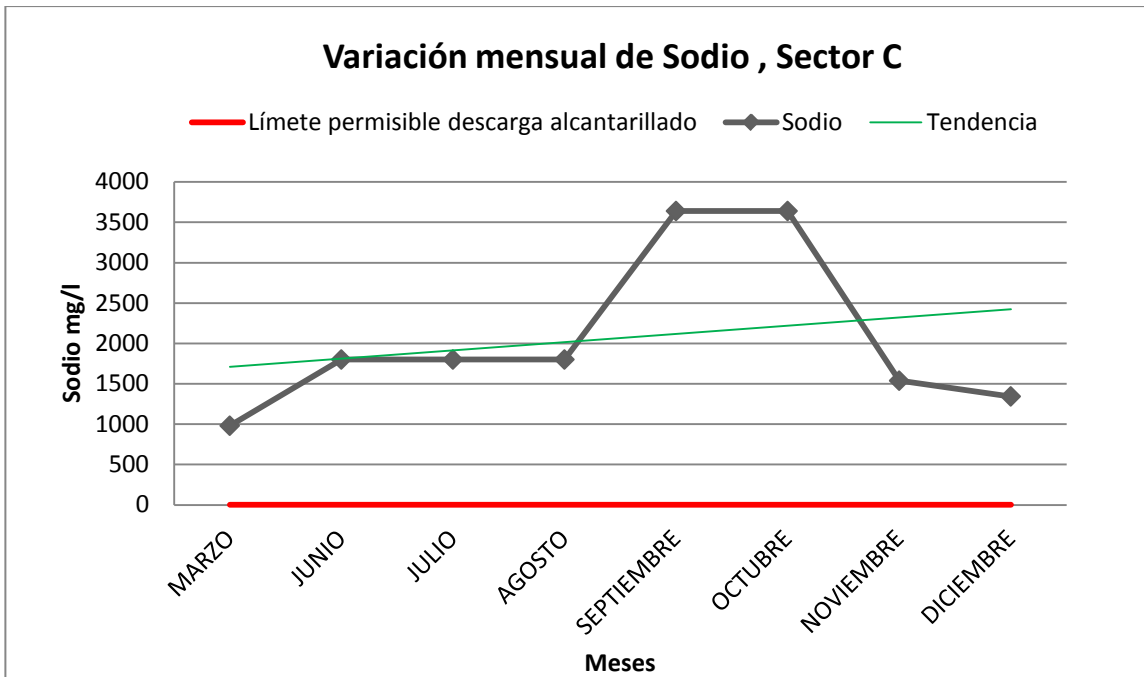


*Fuente:Elaboración propia*

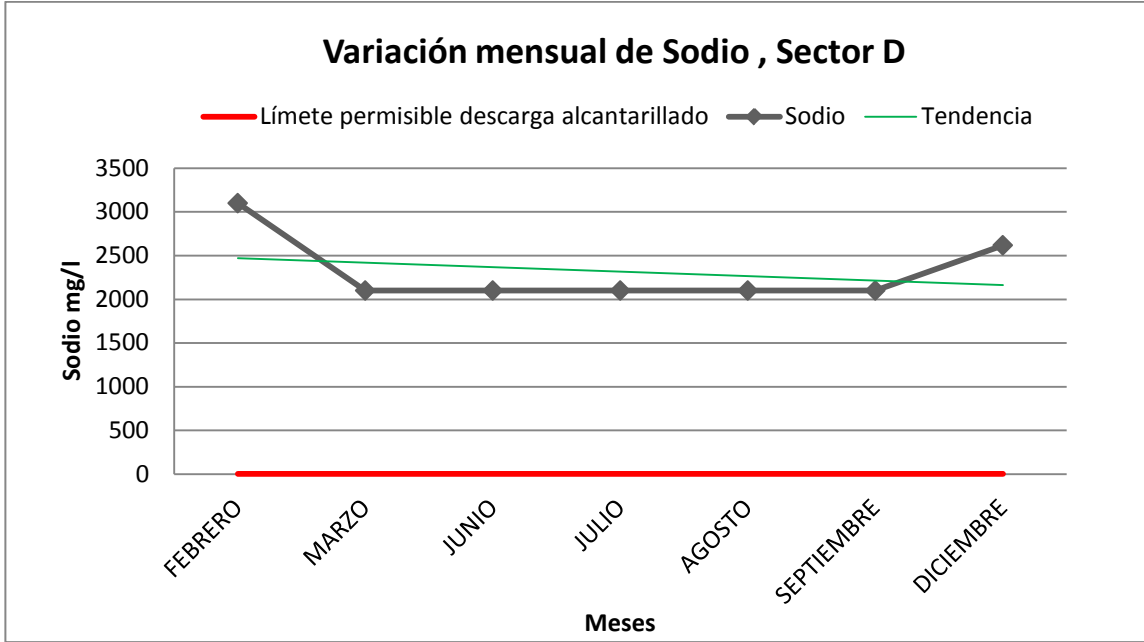
Gráfica 58. Variación mensual de Sodio, Sector A



Gráfica 59. Variación mensual de Sodio, Sector C

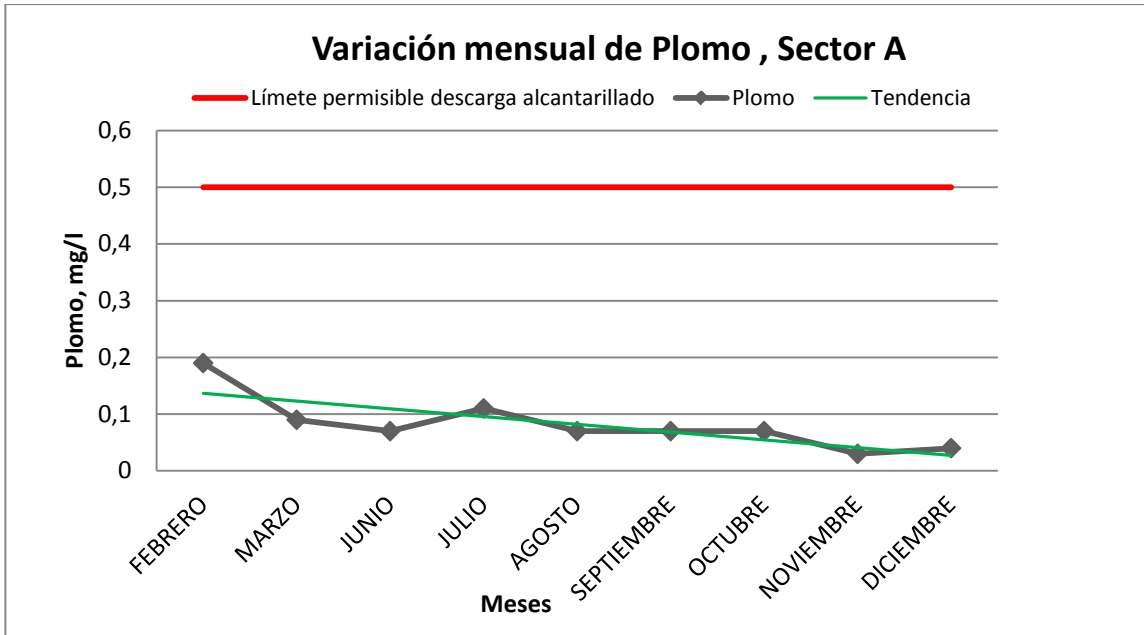


**Gráfica 60. Variación mensual de Sodio, Sector D**



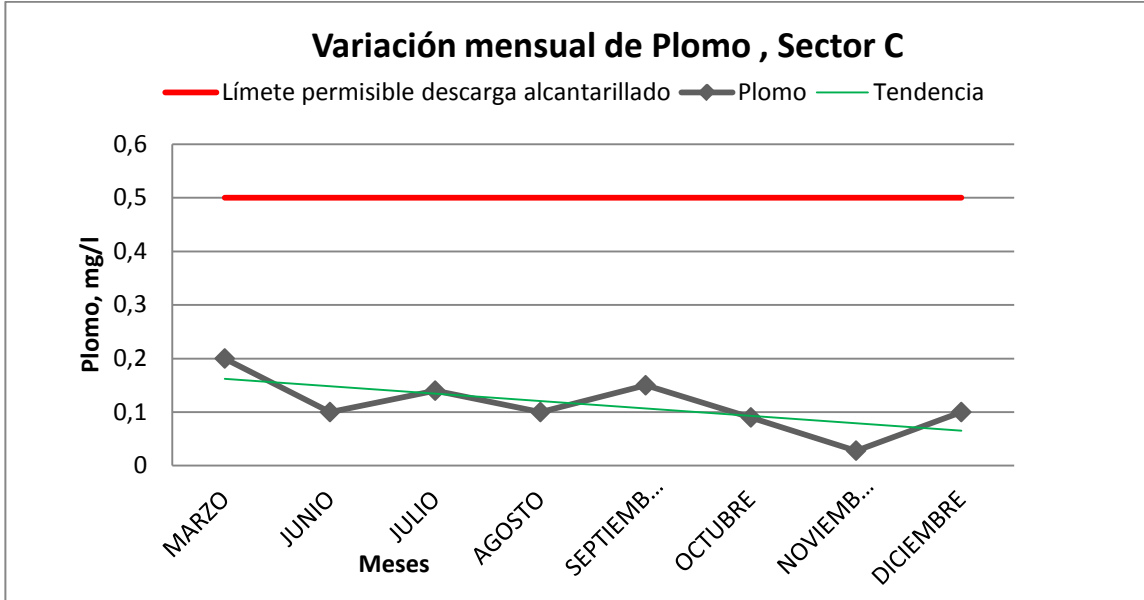
*Fuente:Elaboración propia*

**Gráfica 61. Variación mensual de Plomo, Sector A**

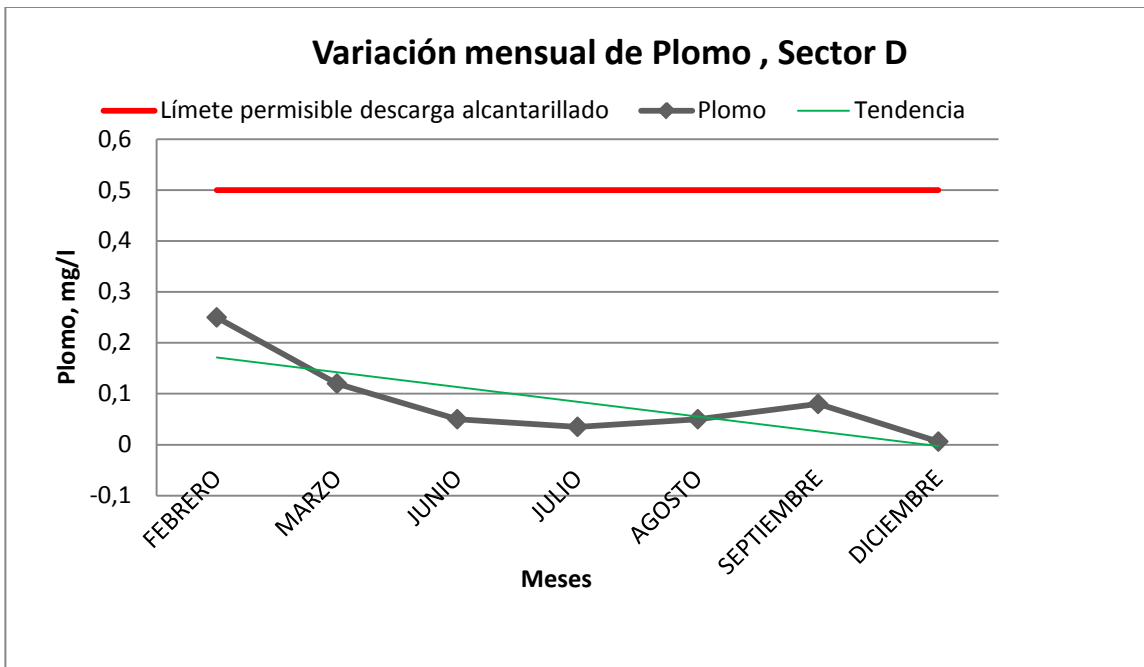




**Gráfica 62. Variación mensual de Plomo, Sector C**

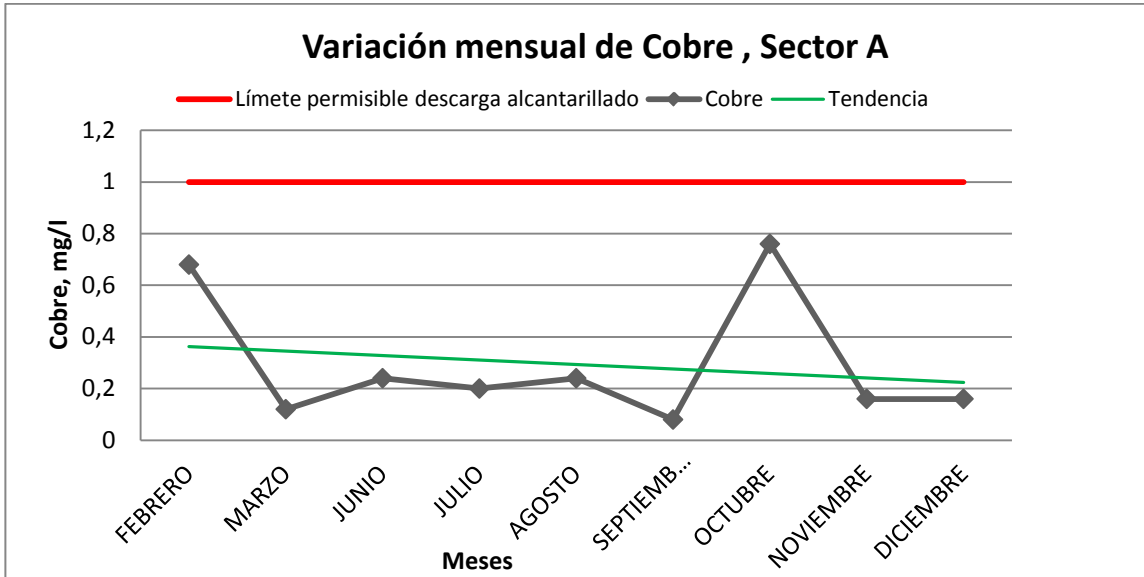


**Gráfica 63. Variación mensual de Plomo, Sector D**

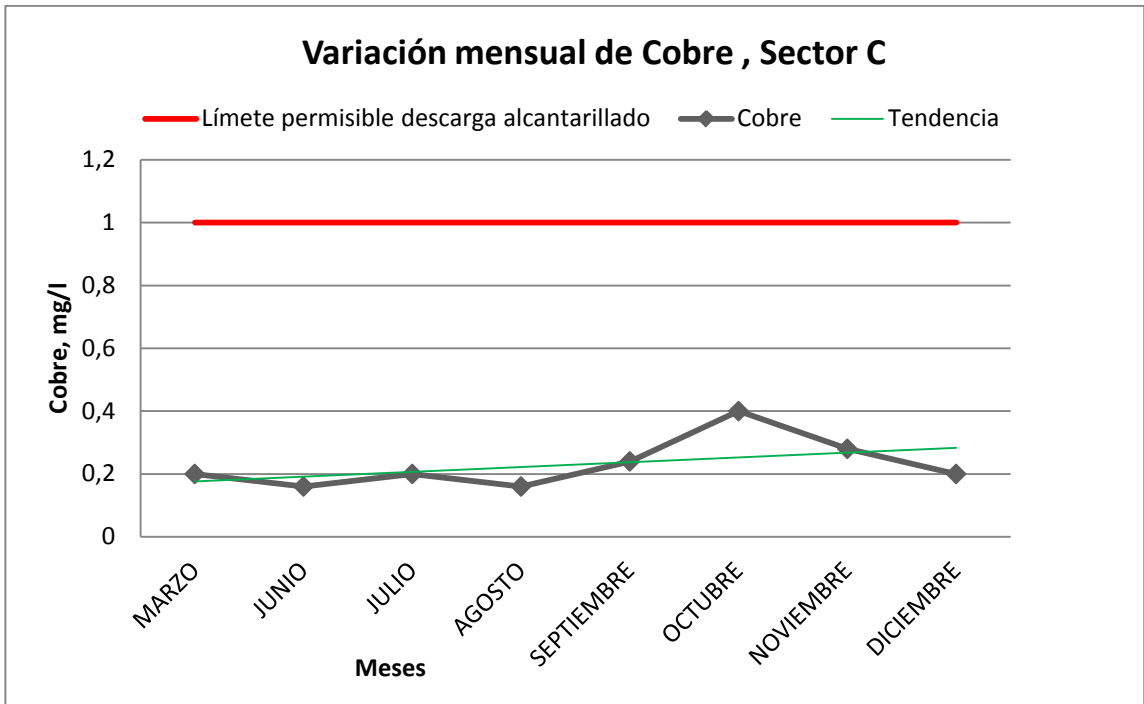


*Fuente:Elaboración propia*

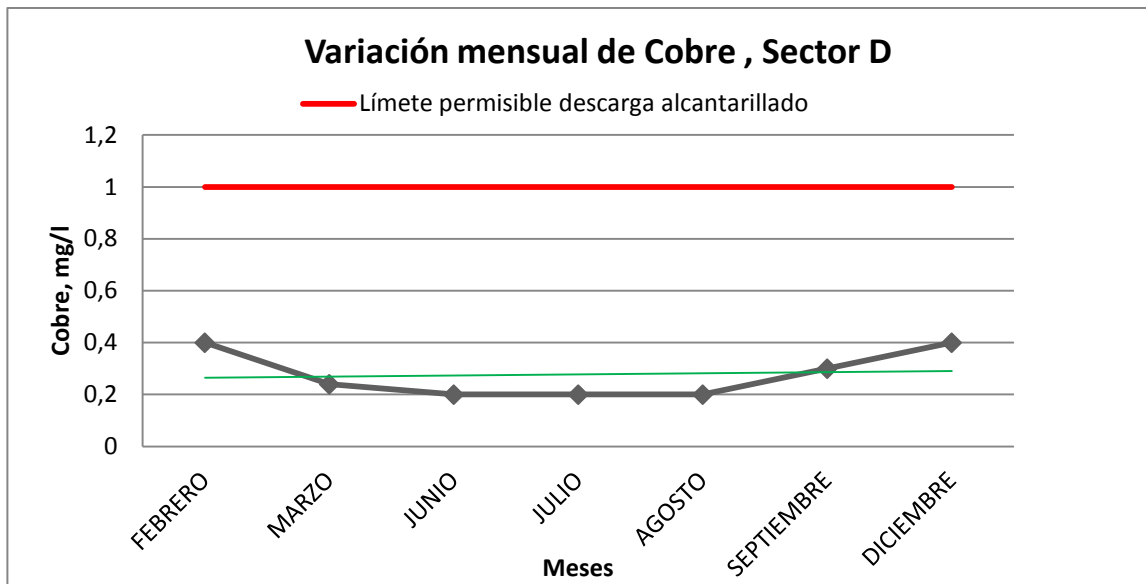
Gráfica 64. Variación mensual de Cobre, Sector A



Gráfica 65. Variación mensual de Cobre, Sector C

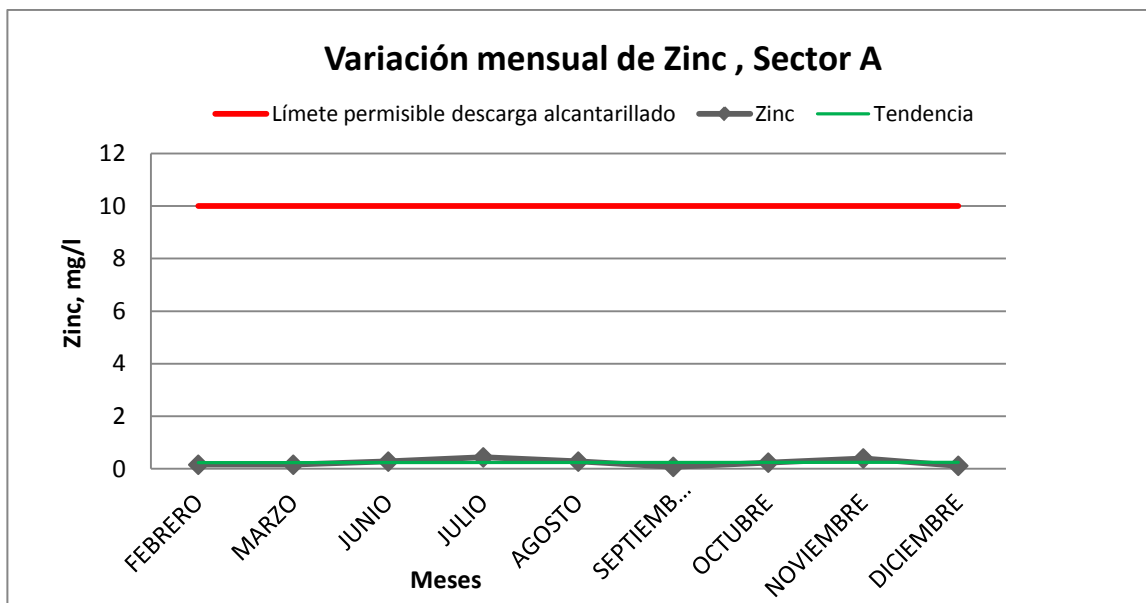


**Gráfica 66. Variación mensual de Cobre, Sector D**

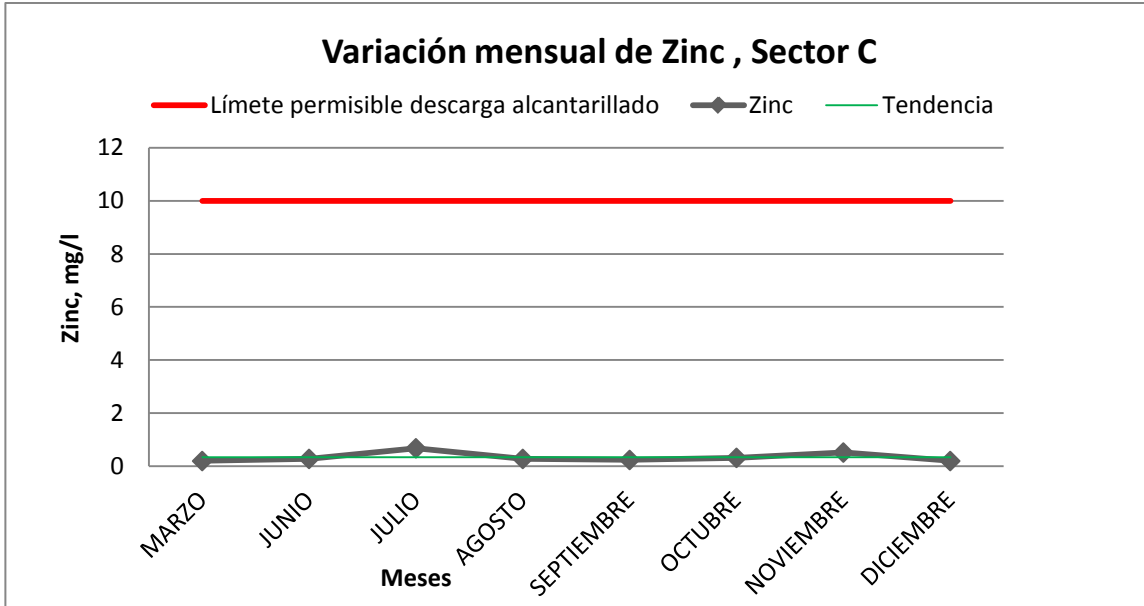


*Fuente:Elaboración propia*

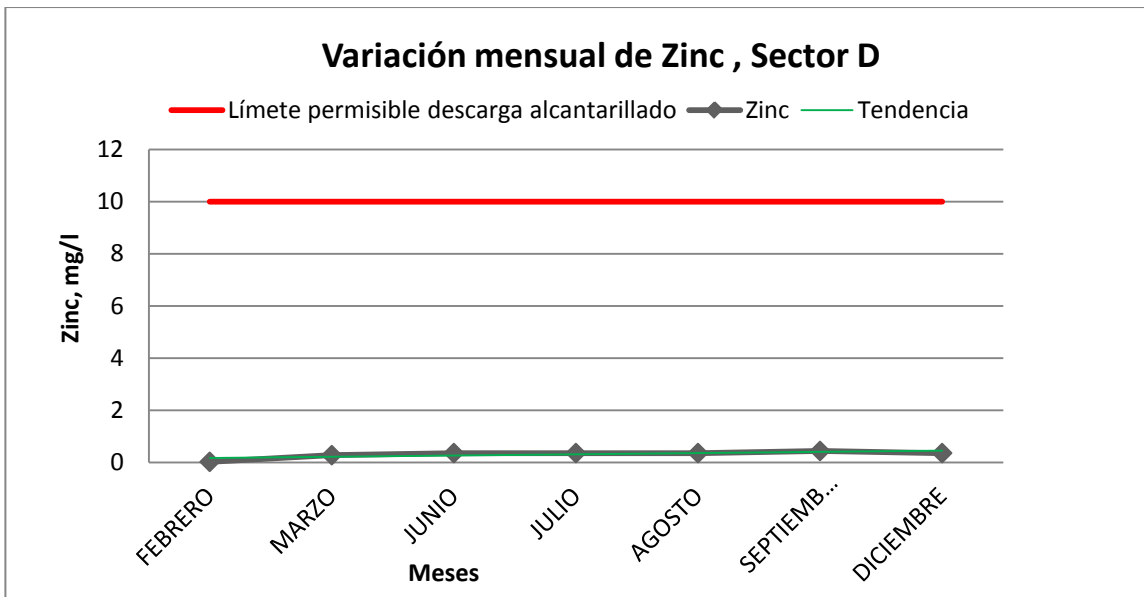
**Gráfica 67. Variación mensual de Zinc, Sector A**



Gráfica 68. Variación mensual de Zinc, Sector C

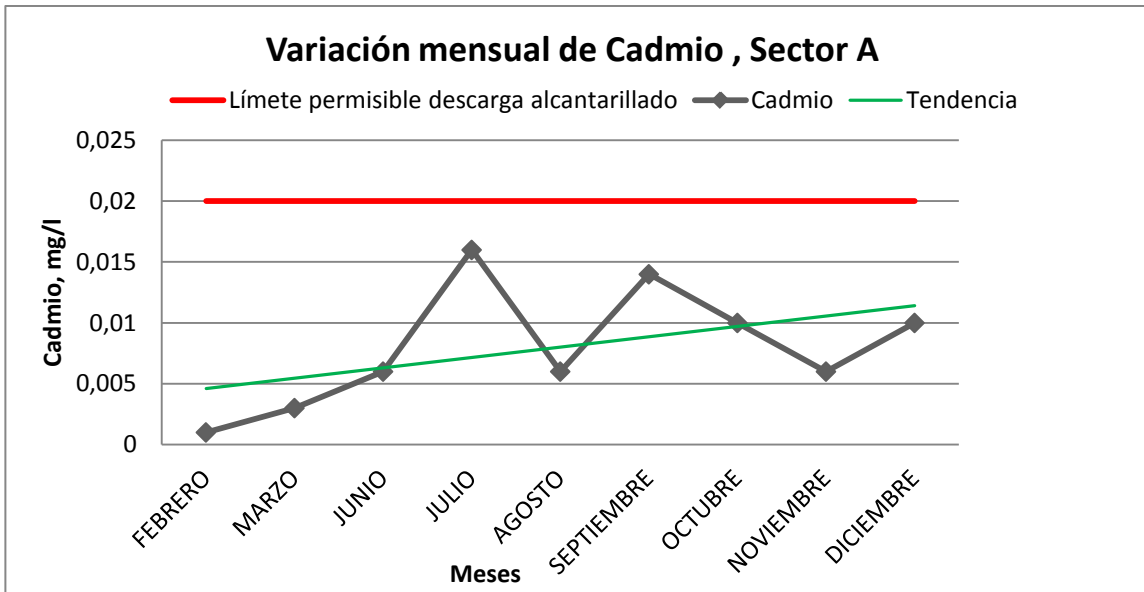


Gráfica 69. Variación mensual de Zinc, Sector D

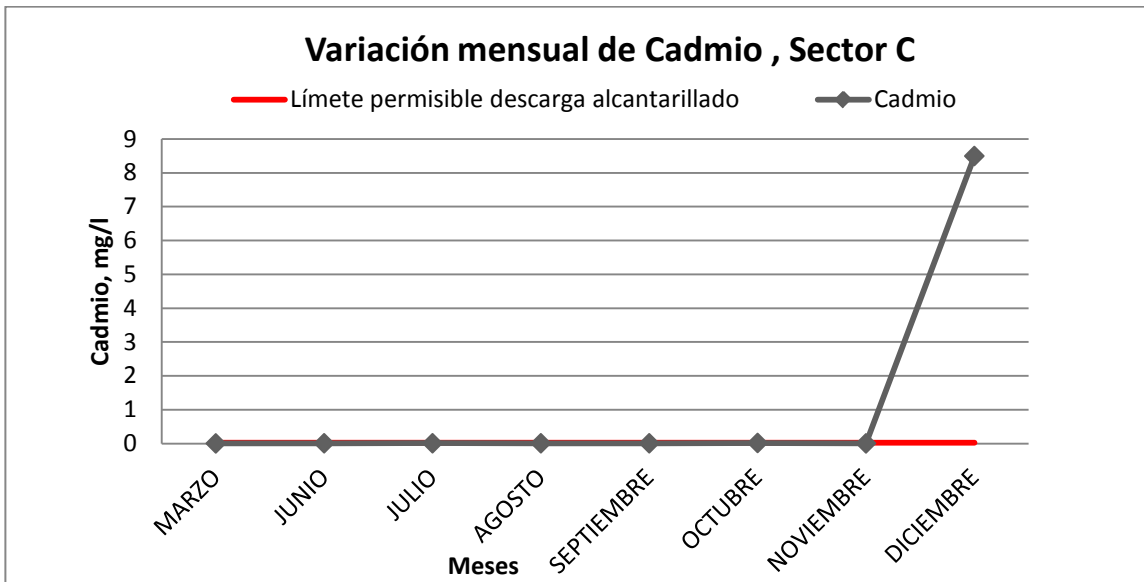


Fuente:Elaboración propia

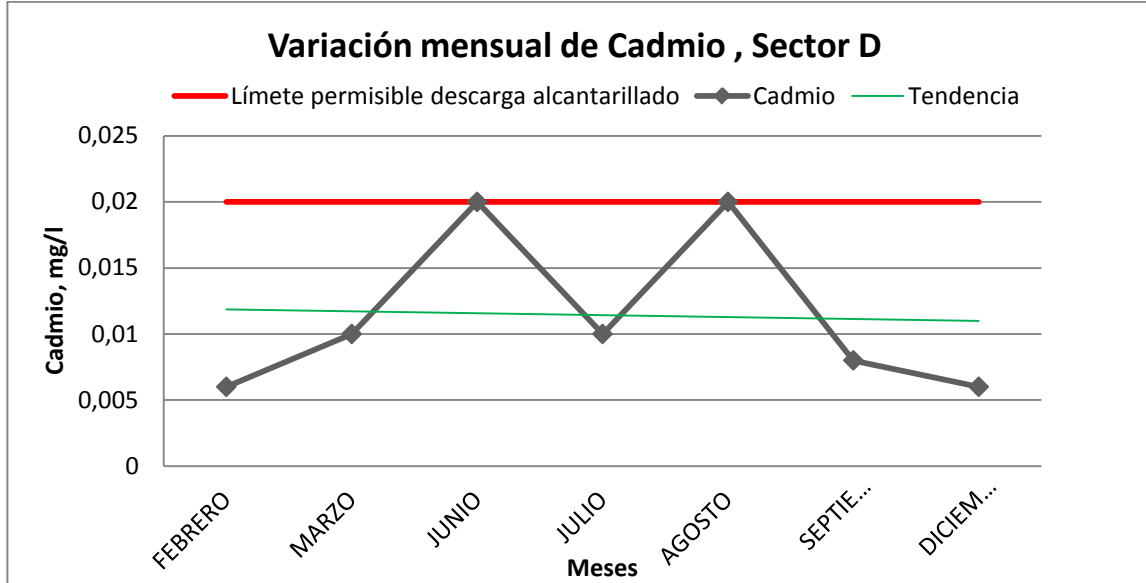
**Gráfica 70. Variación mensual de Cadmio, Sector A**



**Gráfica 71. Variación mensual de Zinc, Sector C**

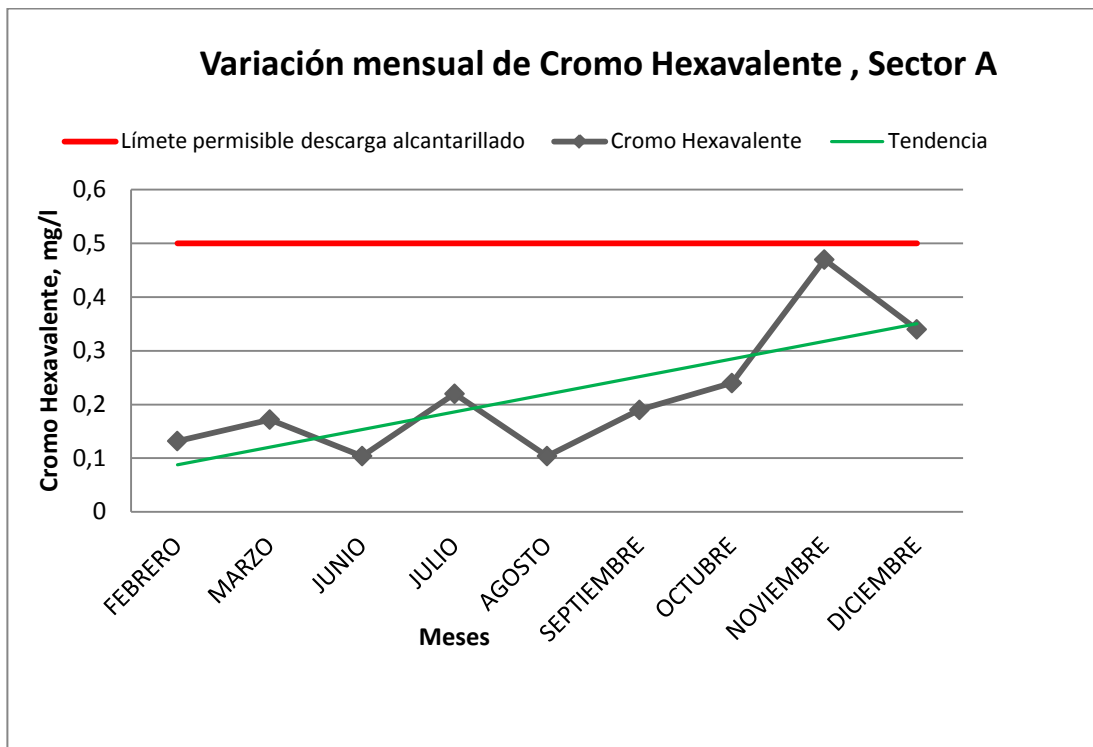


**Gráfica 72. Variación mensual de Zinc, Sector D**

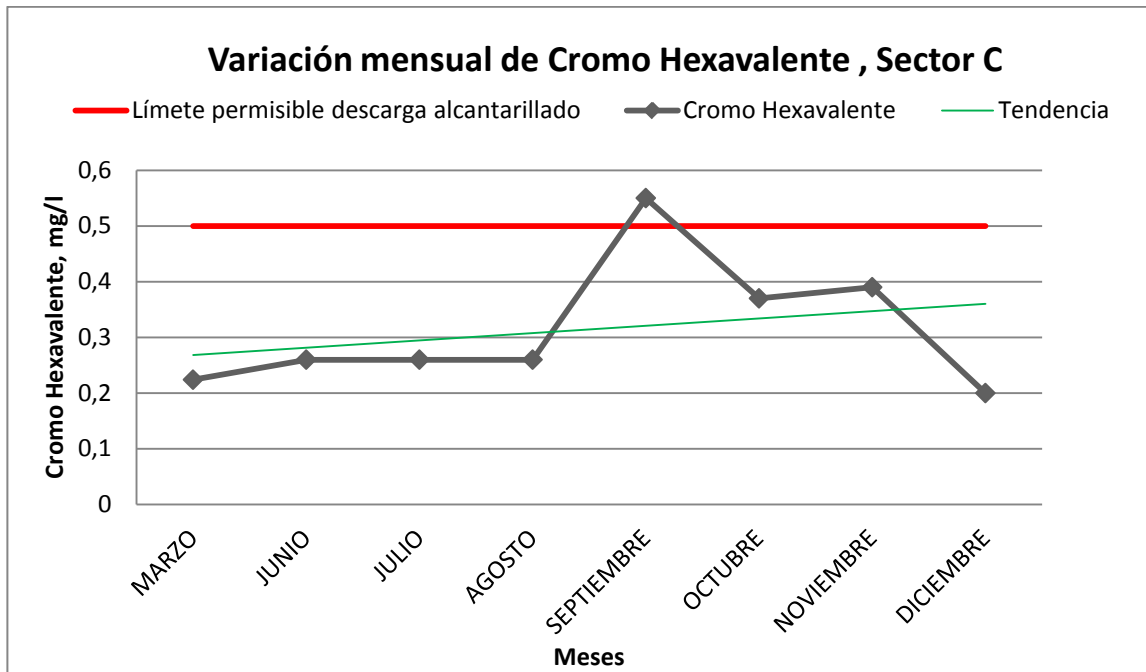


*Fuente:Elaboración propia*

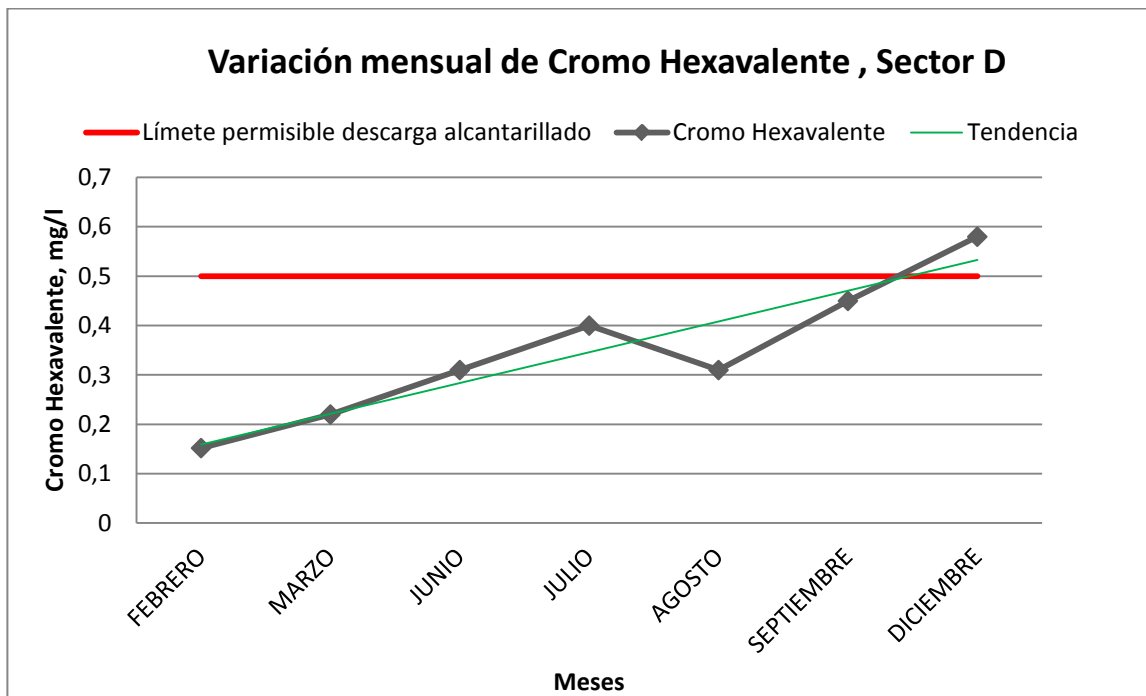
**Gráfica 73. Variación mensual de Cromo Hexavalente, Sector A**



**Gráfica 74. Variación mensual de Cromo Hexavalente, Sector C**

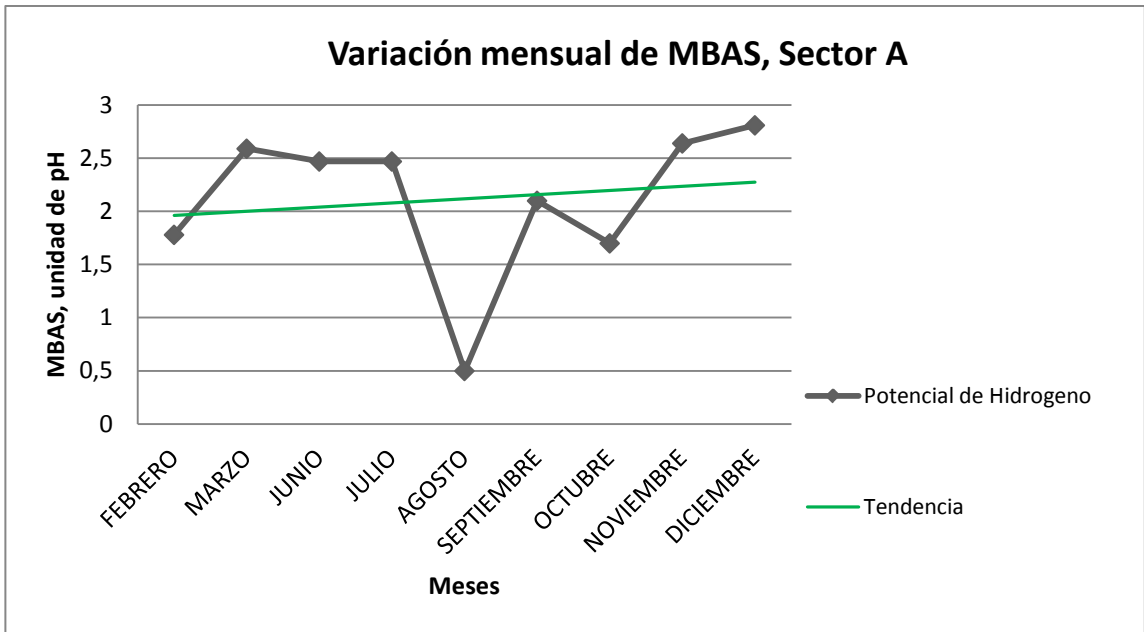


**Gráfica 75. Variación mensual de Cromo Hexavalente, Sector D**

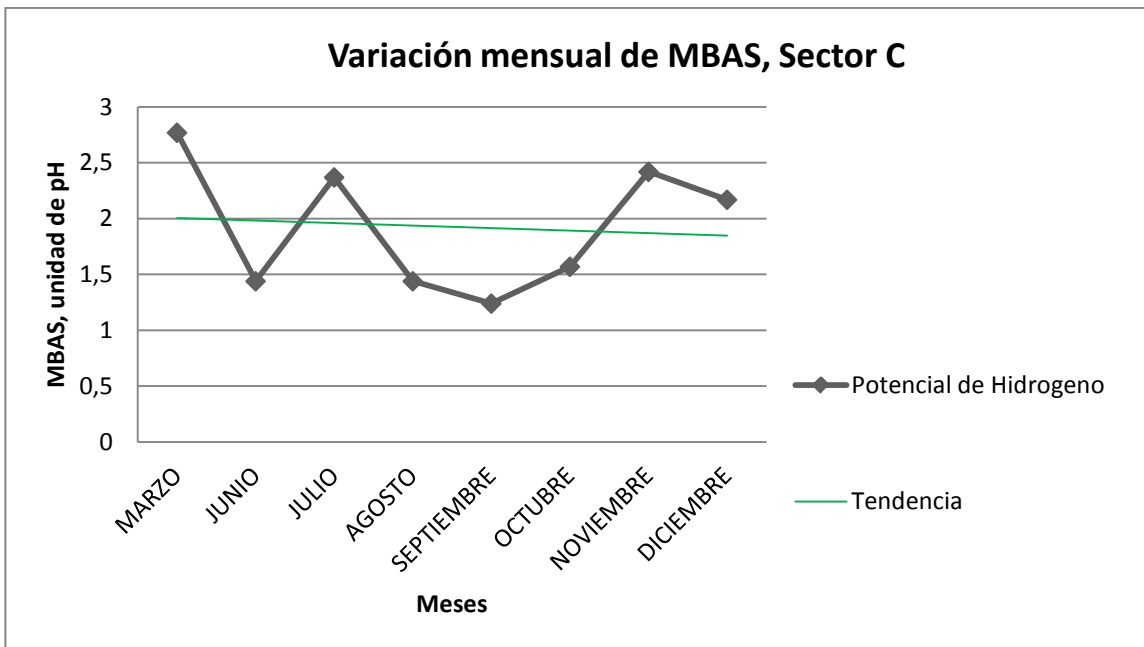


*Fuente:Elaboración propia*

Gráfica 76. Variación mensual de MBAS, Sector A

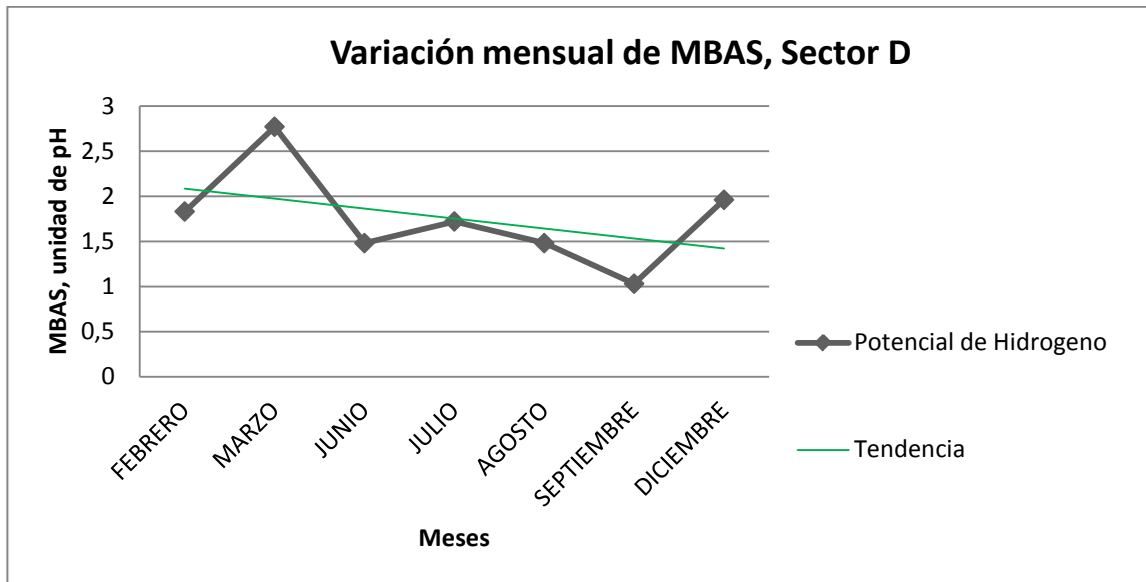


Gráfica 77. Variación mensual de MBAS, Sector C





**Gráfica 78. Variación mensual de MBAS, Sector D**



*Fuente:Elaboración propia*

## 6. METODOLOGIA

### 6.1. Análisis estadístico de la calidad físico química del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas”.

Las características físico-químicas del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas” fue proporcionada por el Laboratorio de lixiviados y gases del Consorcio ILM, el cual se encarga del monitoreo y pruebas del relleno sanitario mes a mes en el año.

En la información existen los parámetros mencionados en la *Tabla 34*, durante el año 2012, la cual es importante para el análisis estadístico.

**Tabla 34. Parámetros usados en el análisis del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas”**

PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA
Temperatura ambiente	°C	SM XXI (edición) 2550B
Potencial de Hidrógeno	Unidad de pH	EPA 150.1 PEE-01(±0.03)
Conductividad a 20 °C	µS/cm	Conductímetro
Caudal	m <sup>3</sup> /día	Cálculo

PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO DE REFERENCIA
Residuos sedimentables a 1 h	ml/1 h	SM XXI (edición) 2540F PEE-06(±0.01)
Residuos Totales	mg/l	SM XXI (edición) 2540B PEE-04(±450)
Residuos no filtrables (suspendidos)	mg/l	SM XXI (edición) 2540C PEE-05(±1)
Residuos filtrables (Disueltos)	mg/l	SM XXI (edición) 2540D
Demanda Química de oxígeno	mg/l	SM XXI (edición) 5220D PEE-03(±70)
Demanda Bioquímica de oxígeno	mg/l	SM XXI (edición) 5210D PEE-02(±31)
Temperatura Bulbo seco	°C	SM XXI (edición) 2550B
Temperatura Bulbo húmedo	°C	SM XXI (edición) 2550B
Temperatura de la muestra	°C	SM XXI (edición) 2550B
SDT a 20 °C	mg/l	Electrométrico
Dureza Total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	SM XXI (edición) 2340C
Dureza cálcica	mg/l CaCO <sub>3</sub>	SM XXI (edición) 2340C
Dureza magnésica	mg/l CaCO <sub>3</sub>	SM XXI (edición) 2340C
Alcalinidad P o F	mg/l CaCO <sub>3</sub>	SM XXI (edición) 2320B
Alcalinidad M o T	mg/l CaCO <sub>3</sub>	SM XXI (edición) 2320B
Alcalinidad Bicarbonato	mg/l CaCO <sub>3</sub>	SM XXI (edición) 2320B
Alcalinidad Carbonato	mg/l CaCO <sub>3</sub>	SM XXI (edición) 2320B
Alcalinidad Hidróxido	mg/l CaCO <sub>3</sub>	SM XXI (edición) 2320B
Amoniaco	mg/l CaCO <sub>3</sub>	SM XXI (edición) 4500 NH <sub>3</sub> F
Amonio	mg/l	Calculado
Nitrógeno Total	mg/l	SM XXI (edición) 4500N
Fósforo total como PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/l	SM XXI (edición) 4500P
Cloruros	mg/l	SM XXI (edición) 4500Cl-B
Sulfatos	mg/l	SM XXI (edición) 4500SO <sub>4</sub> E
Calcio	mg/l	SM XXI (edición) 3500CaB
Magnesio	mg/l	SM XXI (edición) 3500CaB
Hierro	mg/l	SM XXI (edición) 3500FeB
Sodio	mg/l	Electrométrico
Potasio	mg/l	8049HACH
Plomo	mg/l	SM XXI (edición) 3500PbD
Mercurio	mg/l	10065HACH
Cobre	mg/l	8506 HACH
Zinc	mg/l	8009HACH
Cadmio	mg/l	SM XXI (edición) 3500CdD
Cromo Hexavalente	mg/l	SM XXI (edición) 3500Cr D
Cianuros	mg/l	SM XXI (edición) 8027
Fenoles	mg/l	SM XXI (edición) 420.1
MBAS o SAAM	mg/l	SM XXI (edición) 8027

Para el análisis estadístico se evaluará el valor promedio de los parámetros existente en la información (*Anexo 1*), esto nos facilitará saber la calidad del lixiviado para el tratamiento del mismo.

### **6.2. Factibilidad de uso de un reactor UASB como tratamiento secundario biológico.**

Se ha analizado la factibilidad de uso de un reactor UASB en base a su utilización como tratamiento secundario biológico dentro de un tren de tratamiento como lo seleccionado en el *Capítulo 3.5*, con mejores eficiencias probadas de remoción para características físico-químicas similares al lixiviado del relleno sanitario “Las iguanas” y condiciones climáticas similares a la ciudad de Guayaquil como se muestra en la *Tabla 19*.

### **6.3. Dimensionamiento del Reactor UASB**

Las consideraciones para dimensionamiento del reactor UASB están basadas principalmente en los trabajos de Lettinga et als, y consideran principalmente las características del agua residual en términos de la composición y el contenido de sólidos, la carga orgánica volumétrica, velocidad de flujo ascendente, volumen del reactor y aspectos físicos como la distribución del sistema y la recolección del gas.

El diseño del reactor UASB depende de la concentración del DQO del influente a tratar, de acuerdo a esto se considera (Orozco Jaramillo, 2005):

DQO: 5,000 - 15,000 mg/l ó más, el método de diseño debe basarse en la carga orgánica.

DQO < 5000 mg/l, el diseño debe basarse en la velocidad y el tiempo de retención.

El volumen del reactor se diseñará de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V = Q \times THR$$

Donde el tiempo de retención se considerará según la temperatura de la ciudad, establecido en la *Tabla 24*.

La velocidad de flujo ascendente recomendada por Metcalf y Eddy (2003), en la *Tabla 23* para DQO parcialmente soluble, será utilizado para obtener el área del reactor y después su altura.

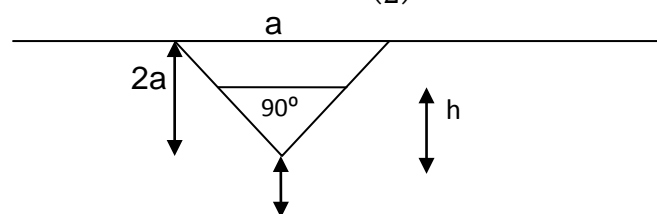
Para la determinación del área servida por los tubos de alimentación de entrada individual se basará en función de las características de los lodos y la carga orgánica como se observa en la *Tabla 25*. Este sistema tiene como función dividir el  $Q_T$  de tal manera que en cada entrada individual tengan el mismo caudal.

Otras características a considerar en el diseño del reactor UASB es La pendiente de la parte inferior del sedimentador, es decir, la pared inclinada del colector de gas, dentro de un rango  $45^\circ$ - $60^\circ$  para reactores de 5- 7 m. como lo recomienda la *Tabla 26*.

Las aristas donde se vierta agua estarán dentadas de manera que tengan 2 vertederos de tipo triangular por cada metro.

Se ha dimensionado la geometría del vertedero triangular a partir de la fórmula de Kindsvater (Orozco Jaramillo, 2005):

$$Q = 4.28 C \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (h + k)^{5/2}$$



El dimensionamiento de los canales del efluente se ha calculado de manera que el tirante uniforme coincida con el tirante crítico a caudal máximo. El tirante crítico lo calculamos mediante el programa H-canales desarrollado en la Escuela Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Versión 3.0 de libre acceso.

Para el cálculo de la bajante de salida del canal de recolección se considera una velocidad de 0.5 m/s.

El reactor UASB presenta otras características físicas de diseño que se registra en lo señalado en la *Tabla 26*.

#### **6.4. Eficiencias esperadas.**

El proceso de manto de lodos anaerobio de flujo ascendente UASB tiene un DQO de entrada similar al lixiviado y su desempeño en la remoción es de 65-85% a diferencia de los demás procesos utilizados.

La elección del tratamiento de lixiviados depende de muchos factores, entre ellos se cuenta los económicos, sociales, geográficos; sin embargo, uno de los parámetros principales es el ambiental, ya que es necesario cumplir los requerimientos establecidos en las normas ambientales para proceder a descargar los efluentes tratados.

Para cumplir con estos objetivos, se debe conocer la eficiencia esperada de cada tratamiento (*Tabla 35*); es decir, las características del efluente tratado, para así poder comparar con los límites permisibles establecidos.

**Tabla 35. Procesos usuales y datos sobre el desempeño de los procesos anaerobios.**

PROCESO	ENTRADA DQO, mg/L	Tiempo de retención hidráulica, h	Tasa de carga orgánica, lb DQO/pe <sup>3</sup> .d	Tasa de carga de los sólidos volátiles, lb SSV/pe <sup>3</sup> .d	Remoción de DQO %
Digestión anaerobia	1500 - 5000	360 - 480	0.1 – 0.3	0.06 – 0.2	45 - 65
Contacto anaerobio	1500 - 5000	2 - 10	0.1 – 1.0		75 - 90
Manto de lodos anaerobio de flujo ascendente (UASB)	5000 - 15000	18 - 30	0.05 – 1.0		65 - 85
Lecho Fluidizado de flujo ascendente	10000 - 20000	18 – 30 65 - 85	0.1 – 1.25		75 - 90
Lecho Fluidizado	5000 - 10000	8 - 16	0.3 – 1.8		80 - 95

*Fuente: (Crites & Tchobanoglous, 2000)*

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Rangos promedio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas”

En la *Tabla 36* se muestran los valores promedio de las características físico-químicas del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas” durante el año, que son importante para evaluar la factibilidad de un reactor UASB.

**Tabla 36. Valores promedio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario "Las Iguanas"**

PARAMETROS	UNIDADES	PROMEDIOS		
		SECTOR A	SECTOR B	SECTOR C
Potencial de Hidrogeno	Unidad de pH	7,900	8,288	7,829
Conductividad a 20 C	µs/cm	14.317,857	20.668,750	23064,286
Caudal	m3/dia	7,967	25,774	599,989
Residuos sedimentales	mg/l	0,171	0,260	0,143
Residuos Totales	mg/l	7.412,111	9.865,375	11420,714
Residuos no filtrables (suspendedos)	mg/l	31,333	31,333	78,286
Demanda Química de oxígeno	mg/l	1.454,444	2.750,000	4110,714
Demanda Bioquímica de oxígeno	mg/l	490,711	975,500	1508,571
Temperatura de la muestra	C	31,867	30,050	37,114
Dureza Total	mg/l CaCO3	2.085,556	1.531,250	1350,000
Dureza cálcica	mg/l CaCO3	367,222	377,125	559,286
Dureza magnésica	mg/l CaCO3	1.718,333	1.144,000	790,714
Amoniaco	mg/l CaCO3	474,422	839,875	1076,143
Amonio	mg/l	501,589	889,125	1139,286
Nitrógeno Total	mg/l	855,000	1.840,625	2112,571
Fósforo total como PO43-	mg/l	14,667	42,313	82,714
Cloruros	mg/l	3.049,444	2.531,250	2682,143
Sulfatos	mg/l	6,587	37,815	13,387
Hierro	mg/l	3,624	4,963	2,666
Sodio	mg/l	2.435,429	2.067,375	2316,857
Plomo	mg/l	0,082	0,114	0,084
Cobre	mg/l	0,293	0,230	0,277
Zinc	mg/l	0,240	0,340	0,312
Cadmio	mg/l	0,008	1,071	0,011
Cromo Hexavalente	mg/l	0,219	0,314	0,346
Fenoles	mg/l	0,505	0,495	0,886
MBAS o SAAM	mg/l	2,118	1,928	1,753

*Fuente: Elaboración propia*

## **7.2. Evaluación teórica de factibilidad de un reactor UASB**

La factibilidad de un reactor UASB como tratamiento secundario biológico en el relleno sanitario “Las Iguanas” en la ciudad de Guayaquil son favorables ya que se ha evaluado el funcionamiento de otros reactores en distinto países del mundo que tienen las mismas características de la calidad del lixiviado y condiciones climáticas similares y como resultado han obtenido altas eficiencias de remoción en un tiempo de retención hidráulica corto como se observa en la *Tabla 19*.

En esta tabla se observa, salvo algunas excepciones, que el pH del lixiviado se encuentra en el rango 5,8–8,5 similares a los valores encontrados en el lixiviado de “Las Iguanas”. Además se observa que a temperaturas como la ciudad de Guayaquil de 20-35 °C se ha obtenido eficiencias del 80% de la remoción de DQO; a temperatura ambiente (20-23 ° C) se obtiene una disminución del 60 %. En el lixiviado se encuentra la DQO a tasas de carga orgánica baja y media entre 1.000 -5.000 mg/l, ideales para este tipo de reactor.

Para esta alternativa debe incluir también la unidad de desinfección por clorificación, eliminando así contaminantes físicos, químicos y biológicos de los lixiviados y poder cumplir con los requisitos establecidos por las normas ecuatorianas de calidad ambiental.

## **7.3. Diseño del reactor UASB**

Para el diseño del reactor UASB tenemos un DQO promedio del lixiviado de 3000 mg/l según lo mencionado en la metodología el diseño se basará en la velocidad y el tiempo de retención.

Calcularemos el volumen del reactor donde:



$$Q_T = \frac{V_R}{THR}$$

$$V_R = Q_T \times THR$$

Donde tomaremos el Tiempo de retención hidráulica (THR) de 9 h en relación a la temperatura de 20-26° de la ciudad de Guayaquil.

$$V_R = Q_T \times THR$$

$$V_R = (633.73 \text{ m}^3/\text{dia}) \times (9 \text{ h}) \times \left(\frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h}}\right)$$

$$V_R = 237.64 \text{ m}^3$$

La altura del reactor se determina según los criterios de la tablas () donde el lixiviado tiene un DQO es parcialmente soluble y la velocidad de flujo ascendente es de 1m/h y una altura de reactor (H) típica de 6 m. De este valor obtenemos el área en planta del reactor (A) y sus dimensiones.

A = área del reactor (m<sup>2</sup>)

H = altura del reactor (m)

$$A = \frac{V_R}{H}$$

$$\frac{V_R}{H} = \frac{237.64 \text{ m}^3}{6 \text{ m}}$$

$$A = 39.60 \text{ m}^2$$

$$A = 2 \times a^2$$

$$a = 4.45 \approx 4.50 \text{ m}$$

En este trabajo de grado se asumió  $2.25 \text{ m}^2$  cada área de entrada individual de los tubos de alimentación de acuerdo a tabla (). Teniendo como resultado 18 puntos de entrada del efluente. El caudal por entrada de efluente se define de la siguiente manera.

$$Q_e = \frac{Q_T}{18}$$

$$Q_e = 35.21 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Donde el área de cada tubo de entrada del efluente es:

$$Q = A \times V$$

$$A = \frac{Q}{V}$$

$$A = \frac{35.21 \text{ m}^3/\text{dia}}{(0.3 \text{ m/s}) \times \left(\frac{86400 \text{ s}}{\text{dia}}\right)}$$

$$A = 0.0014 \text{ m}^2$$

De acuerdo al área podemos determinar el diámetro de la tubería a utilizar

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = 0.045 \text{ m} \approx 2''$$

Para el diseño del reactor se considerará adicionalmente una pendiente de  $45^\circ$  para el sedimentador y su altura de 1.50 m de acuerdo a la altura del reactor como lo indica la *Tabla 26*.

El sistema de recolección de efluentes tiene dos canales. de tal manera que las aristas donde se vierta agua estarán dentadas de manera que tengan 2 vertederos de tipo rectangular cada metro quedando así:

$$2 \text{ aristas} \times 4.50 \text{ m} \times 2 \frac{\text{vertederos}}{\text{m}} = \mathbf{18 \text{ vertederos triangulares}}$$

El caudal que debe verter cada vertedero es:

$$Q_v = \frac{Q_T}{18}$$

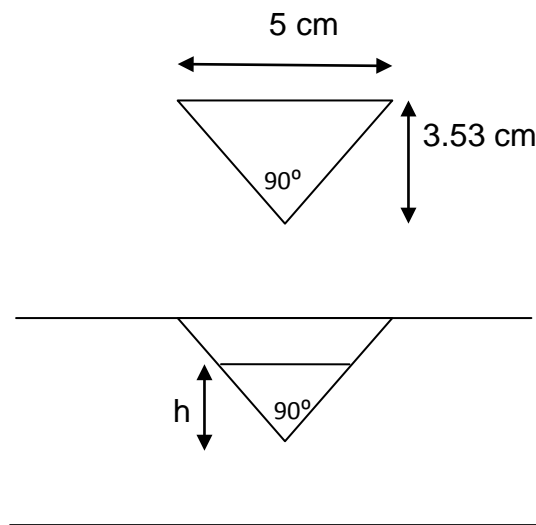
$$Q_T = 633.73 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_T = 7.33 \text{ l/s}$$

$$Q_v = 0.41 \text{ l/s}$$

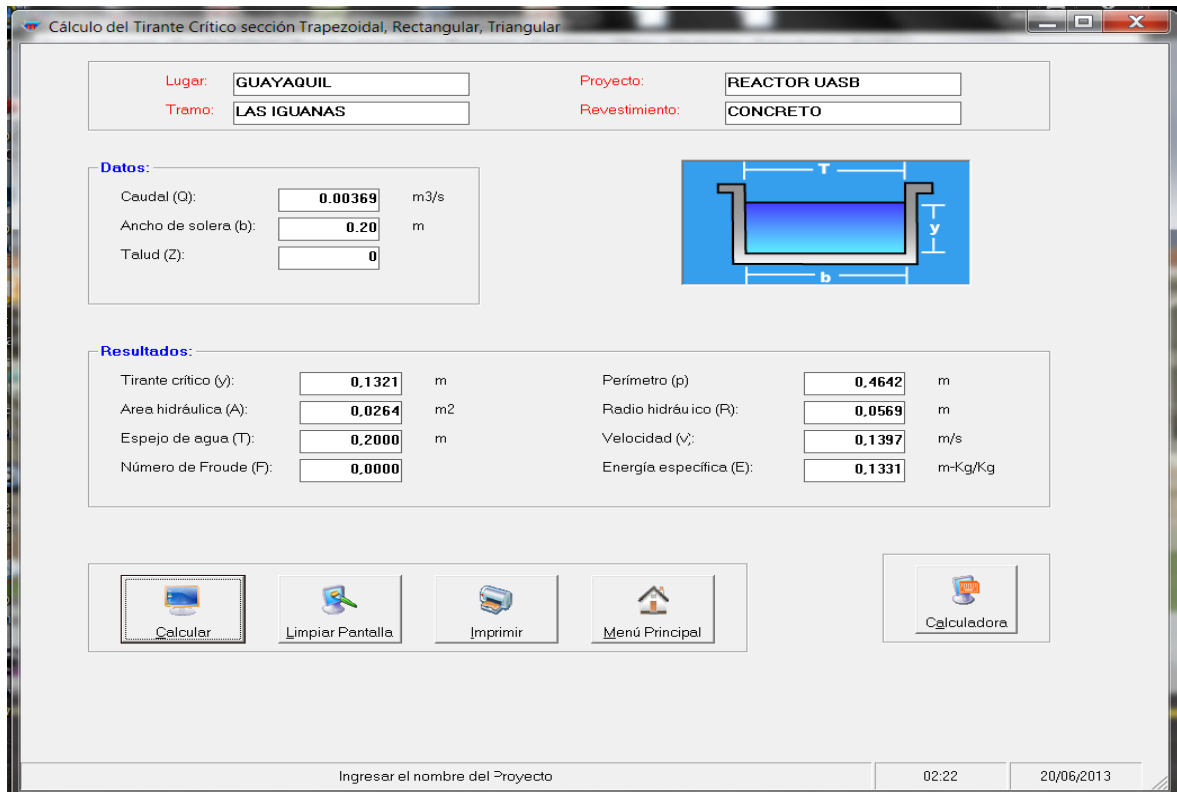
Se ha dimensionado la geometría del vertedero triangular a partir de la formula de Kindsvater:

$$Q = 4.28 C \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (h + k)^{5/2}$$



$$h = 1.14 \text{ cm}$$

El tirante crítico lo calculamos mediante el programa H-canales desarrollado en la Escuela Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Versión 3.0 de libre acceso.

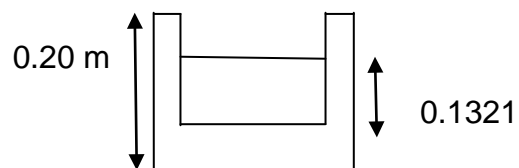


Y el caudal por cada canal sería de:

$$Q_C = 9 \times 0.41 \text{ l/s}$$

$$Q_C = 3.69 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 0.00369 \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde la tubería de recolección de efluente tiene el diámetro de:



$$V = 0.5 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{Q}{V}$$

$$A = \frac{0.00369 \text{ m}^3/\text{s}}{0.5 \text{ m}^3/\text{s}}$$

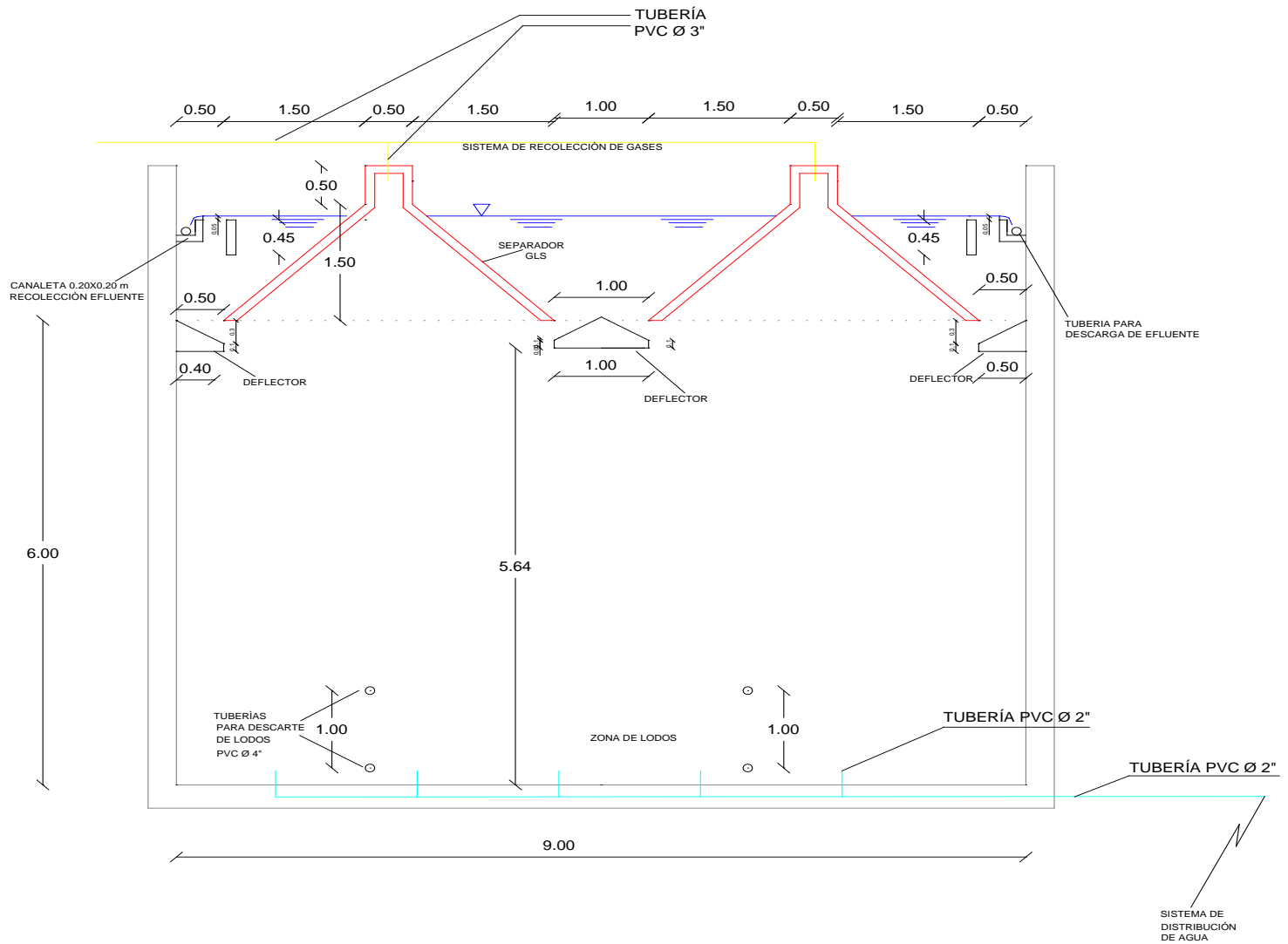
$$A = 0.0074 \text{ m}^2$$

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4}$$

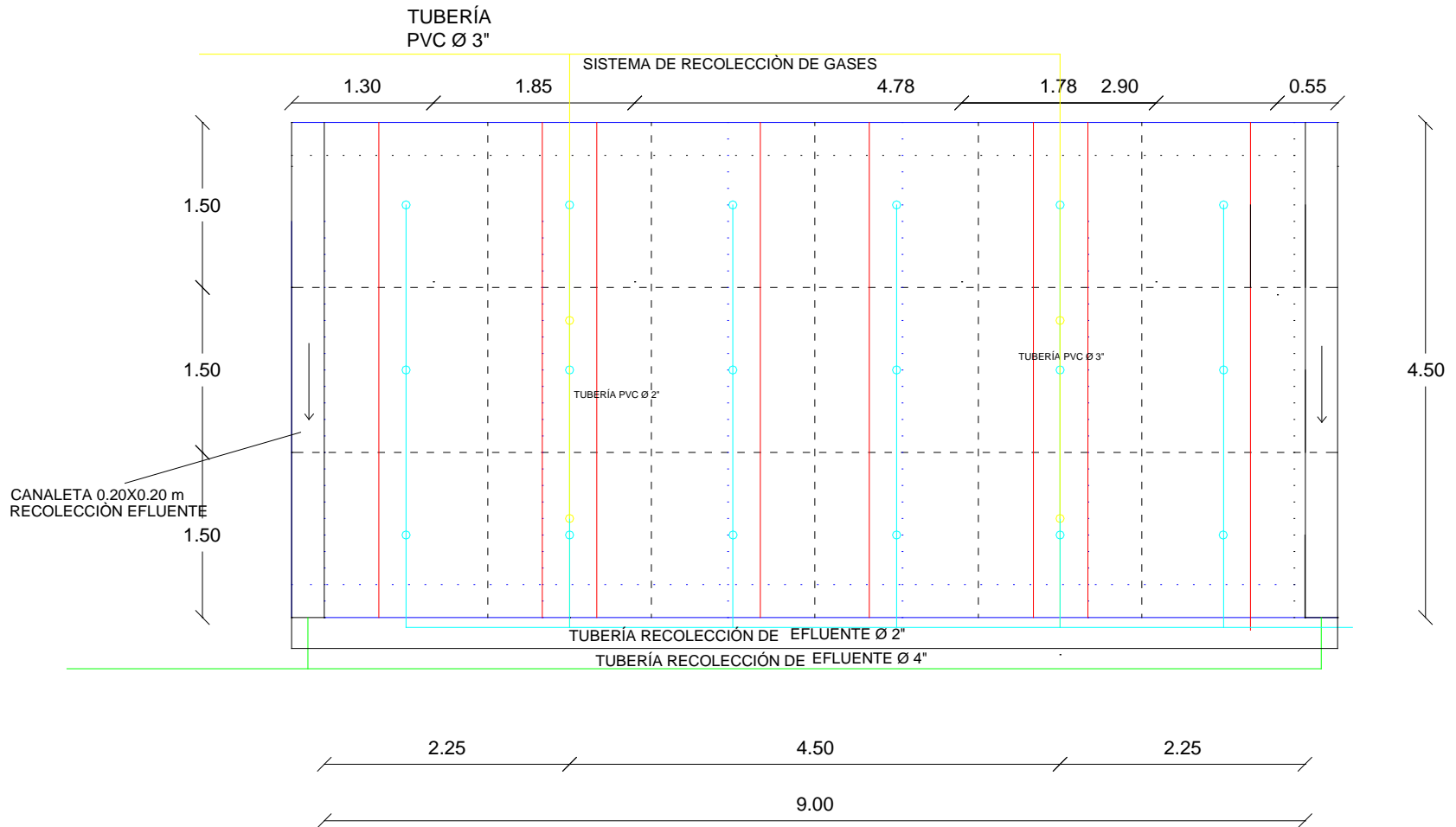
$$D = 4''$$

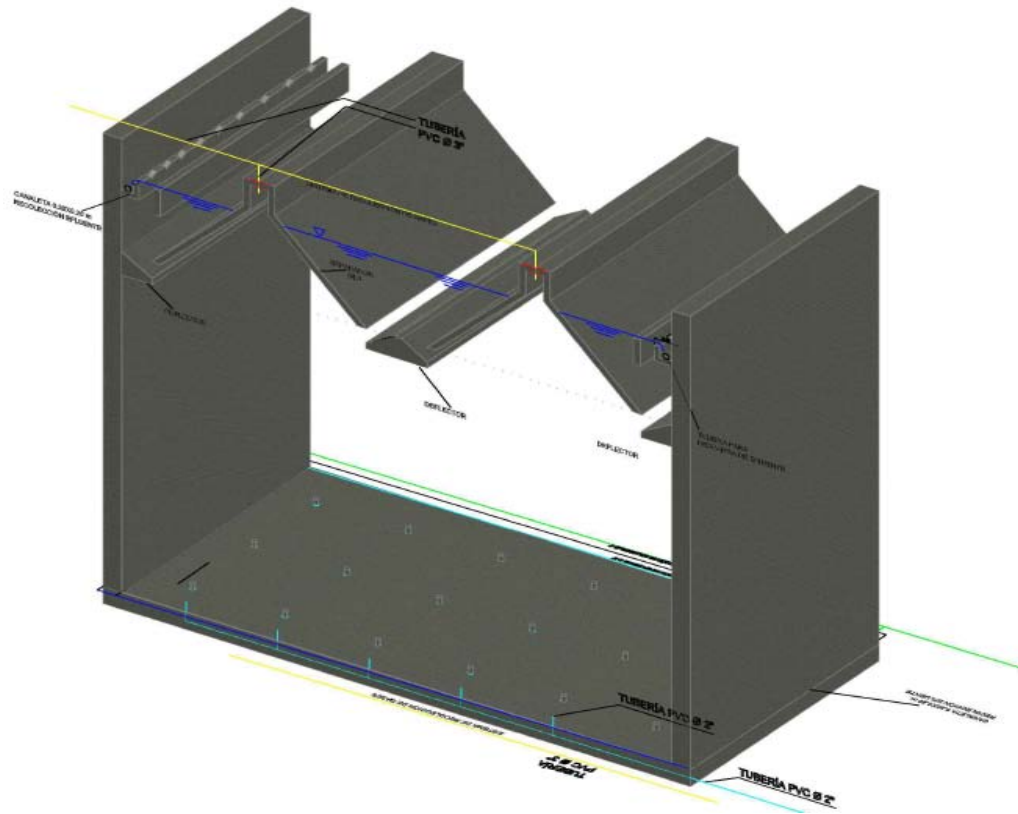
#### 7.4. Planos del reactor UASB: Alzado, planta y 3D.

# REACTOR UASB - ALZADO



# REACTOR UASB - PLANTA





## REACTOR UASB – 3D



## 8. CONCLUSIONES

- Teóricamente es factible diseñar un tratamiento para el relleno sanitario las iguanas que considere un proceso biológico como el reactor UASB, esto es para la remoción de la mayor parte de la carga orgánica del lixiviado.
- Existe múltiples casos de experiencias exitosas de aplicación del reactor UASB para el tratamiento de lixiviado en rellenos sanitarios. Se esperan eficiencias de remoción en un rango de (60-80%) en condiciones climáticas similares de Guayaquil.
- Las características requeridas del efluente hacen necesario que se diseñe un pre tratamiento antes del reactor UASB.
- Para cumplir con los estándares de calidad en cuanto a la remoción de microorganismos patógenos es necesario contar con un proceso de desinfección adecuado como el sistema de cloración que ha sido diseñado.
- El reactor UASB es un tratamiento mucho más económico que aquellos físicos químicos avanzados como membranas de nanofiltración y osmosis inversa, los requerimientos de energía son nulos en comparación con los de un proceso de membrana.
- El reactor UASB como proceso de tratamiento tiene eficiencias teóricas de remoción de carga orgánica muy superiores a los de otros procesos usualmente utilizados como son lagunas de oxidación y humedales artificiales. Además los requerimientos de superficies son muchos menores.

- La cantidad de sólidos suspendidos presentes en el lixiviado el relleno sanitario podría ser un limitante ya que podría interferir con el desarrollo del lodos granulares de alta densidad por lo cual fue necesario considerar dentro del tren de tratamiento un sedimentador antes del reactor UASB.

## **9. RECOMENDACIONES**

- El diseño de una planta de tratamiento con un proceso biológico tipo UASB tendrá altas remociones al desarrollarse en un rango de temperatura (alrededor 25°C) en un rango de temperatura que favorece a los procesos de degradación de la materia orgánica.
- Debido a la probabilidad de que el cloro residual remanente en el efluente reaccione con la materia orgánica, es necesario complementar este diseño con un sistema de dechloración, evitando de esta manera la formación de subproductos de la desinfección como: Trihalometanos, y ácidos acéticos halogenados.
- Se recomienda realizar análisis al lixiviado para determinar la concentración de ácidos grasos volátiles (propionico y butírico) para poder corroborar la carga orgánica de diseño.
- Se recomienda también realizar mensualmente análisis de coliformes fecales al lixiviado para corroborar la dosis de cloro para la que se ha diseñado el sistema de clorificación ya que estudios anteriores descartan la presencia coliformes en el lixiviado de rellenos sanitario de “Las Iguanas”.

- Se recomienda también diseñar un sistema de recolección y aprovechamiento de biogás generado el cual en un porcentaje mayor al 60% corresponde a metano. Esta energía podrá utilizarse para satisfacer necesidades energéticas locales.

## 10. BIBLIOGRAFIA

Aisse, M. M. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en reactores anaeróbicos de flujo ascendente en manto de lodos*. Lima: CEPIS.

Ambientum. (2012). *Ambientum.com*. Obtenido de [http://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/suelos/mecanismos\\_fermentacion\\_anaerobia.asp](http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/mecanismos_fermentacion_anaerobia.asp)

Caicedo Messa, F. J. (2006). *Diseño, construcción y arranque de un reactor UASB piloto para el tratamiento de lixiviados*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Chang Gómez, J. V. (2008). *Escuela Superior Politecnica del Litoral*. Recuperado el 2013, de [www.dspace.espol.edu.ec](http://www.dspace.espol.edu.ec)

Collazos Peñaloza, H. (2008). *Diseño y operación de rellenos sanitarios* (Tercera ed.). Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Consortio-ILM "Las Iguanas". (2012). Recuperado el 2013, de <http://consorcio-ilm.com>

Crites, & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: Mc Graw Hill Interamericana.

Giraldo, E. (1997). *Tratamiento de Lixiviados en rellenos sanitarios*.

Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1996). *Environmental science and engineering* (2 ilustrada ed.). Michigan: Prentice Hall PTR.

Ingenieros Inc. (31 de Julio de 2008). (J. V. Pérez, Editor) Obtenido de <http://www.ingenierosinc.com/2008/07/31/mas-sobre-los-rellenos-sanitarios/>

Luna, F. S., & Salminci, J. G. (Octubre de 2008). *Instituto Nacional de Tecnología Industrial*. Obtenido de INTI: <http://www.inti.gov.ar/sabercomo/sc69/inti7.php>

Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering*. USA: Mc Graw Hill.

Ministerio del ambiente, R. d. (2003). *Texto unificado de legislación secundaria ambiental de la república del Ecuador, libro VI anexo 6: Manejo de desechos sólidos no peligrosos*. Ecuador.

Ministerio del Ambiente, R. d. (2003). *Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental, Libro VI Anexo 1: Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes: recurso agua*. Ecuador.

- OPS/CEPIS. (2005). *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores*. Lima.
- Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. CEPIS.
- Orozco Jaramillo, A. (2005). *Bioingeniería de aguas residuales : teoría y diseño*. Bogota: Acodal.
- Pfeffer, J. T. (1992). *Solid Waste Management Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Renoua, S., Givaudana, J.-G., Poulaina, S., Dirassouyanb, F., & Moulinc, P. (2004). *Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunities*. Francia.
- Robles Martinez, F. (2008). *Generación de Biogas y lixiviados en el relleno sanitario*. México: Dirección de Publicaciones.
- Romero Rojas, J. A. (2008). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Eliassen, R. (1977). *Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill Book Company.
- Winkler, M. (2000). *Tratamiento Biológico de aguas de desecho* (SEXTA ed.). LIMUSA.

## 11. ANEXOS

**ANEXO 1:** Análisis de las características del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas”, Sector A.

ANALISIS DEL RELLENO SANITARIO "LAS IGUANAS" SECTOR A-2012										
PARAMETROS	UNIDADES	FEBRE	MAR	JUNIO	JULIO	AGO	SEPTI	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Potencial de Hidrogeno	Unidad de pH	7,7	7,8	7,9	8	7,9	7,9	7,7	8,1	8,1
Conductividad a 20 C	µs/cm	14.0 20	10.3 90	13.9 40	16.2 80	13.9 40	14.9 25	11.73 0	13.530	15.880
Caudal	m3/dia	2,13	1,11	4,39	44,5	4,39	4,39	2,39	3,6	4,8
Residuos sedimentales	mg/l	0,2	ND	0,1	0,2	0,1	ND	0,3	0,2	0,1
Residuos Totales	mg/l	5.41 6	5.41 6	8.53 0	7.14 9	8.53 0	8.53 0	6.915	8.240	7.983
Residuos no filtrables (suspendidos)	mg/l	84	84	10	9	10	10	29	23	23
Demanda Química de oxigeno	mg/l	950	140 0	1.23 0	1.38 0	1.23 0	1.52 0	2.400	1.460	1.520
Demanda Bioquímica de oxigeno	mg/l	399	208	709	257, 4	709	709	810	296	319
Temperatura de la muestra	C	28,5	33,3	34,3	33,9	34,3	31,5	32,2	24,3	34,5
Dureza Total	mg/l CaCO3	1.27 0	1.56 0	2.36 0	2.70 0	2.36 0	2.36 0	2.360	1.820	1.980
Dureza cálcica	mg/l CaCO3	190	190	357	596	357	300	300	405	610
Dureza magnésica	mg/l CaCO3	1.08 0	1.37 0	2.00 3	2.10 4	2.00 3	2.06 0	2.060	1.415	1.370
Amoniaco	mg/l CaCO3	389	269	351	624, 7	351	778	367	606,7	533
Amonio	mg/l	412	254	372	660, 7	372	824	389	644,6	586
Nitrógeno Total	mg/l	641	490	830	1.15 0	830	1.24 0	603	999	912
Fosforo total como PO43-	mg/l	1	1	15	23,7	15,0	19,3	19,3	16,5	21,2
Cloruros	mg/l	4.17 5	2.62 5	2.80 0	3.25 0	2.80 0	2.86 0	2.860	3.000	3.075
Sulfatos	mg/l	ND	ND	3	6,4	2,7	9,6	N/D	0,32	17,8
Hierro	mg/l	4,12	3,44	3,44	5,28	3,44	2,0	5,7	2,0	3,2

Sodio	mg/l	3.10 0	2.01 0	2.03 0	2.03 0	2.03 0	2.92 4	2.924	7.48	7.48
Plomo	mg/l	0	0,09	0,07	0,11	0,07	0,07	0,07	0,03	0,04
Cobre	mg/l	0,68	0,12	0,24	0,20	0,24	0,08	0,76	0,16	0,16
Zinc	mg/l	0,16	0,16	0,28	0,44	0,28	0,08	0,24	0,4	0,12
Cadmio	mg/l	0,00 1	0,00 3	0,00 6	0,01 6	0,00 6	0,01 4	0,01	0,006	0,01
Cromo Hexavalente	mg/l	0,13 2	0,17 2	0,10 4	0,22	0,10 4	0,19	0,24	0,47	0,34
Fenoles	mg/l	0,59	0,25 2	0,55 8	0,98 4	0,55 8	0,12	0,19	0,786	0,51
MBAS o SAAM	mg/l	1,78	2,59	2,47	2,47	0,5	2,1	1,7	2,64	2,81

Fuente: Laboratorio Consorcio ILM, 2012

**ANEXO 2:** Análisis de las características del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas”, Sector C.

ANALISIS DEL RELLENO SANITARIO "LAS IGUANAS" SECTOR C - 2012									
PARAMETROS	UNIDADES	MARZO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE
Potencial de Hidrogeno	Unidad de pH	8,0	8,2	8,2	8,2	8,4	8,6	8,4	8,3
Conductividad a 20 C	µs/cm	24.800	20.200	22.600	20.200	20.700	18.760	19.490	18.600
Caudal	m3/dia	21	28,16	21,0	28,16	28,16	28,0	28,16	23,55
Residuos sedimentales	mg/l	ND	0,4	0,1	0,4	ND	N/D	0,1	0,3
Residuos Totales	mg/l	13.456	8.380	11.476	8.380	8.380	9.319	11.406	8.126
Residuos no filtrables (suspendidos)	mg/l	13	12	7	12	12	21	41	68
Demanda Química de oxígeno	mg/l	1.900	2.650	3.160	2.650	3.100	3.700	2.810	2.030
Demanda Bioquímica de oxígeno	mg/l	780	1.224	1.080	1.224	1.224	1.224	468	580
Temperatura de la muestra	C	29,0	33,3	33,6	33,3	23,5	25,6	27,6	34,5

Dureza Total	mg/l CaCO3	590	2.10 0	2.05 0	2.100	2.100	2.100	620	590
Dureza cálcica	mg/l CaCO3	330	413	320	413	413	413	410	305
Dureza magnésica	mg/l CaCO3	260	1.68 7	1.73 0	1.687	1.687	1.687	210	204
Amoniaco	mg/l CaCO3	394	724	1.12 3	724	844	1.009	997	904
Amonio	mg/l	418	766	1.18 9	766	893	1.068	1.056	957
Nitrógeno Total	mg/l	720	1.80 0	3.70 0	1.800	1.540	2.037	1.638	1.490
Fosforo total como PO43-	mg/l	14	52	57	52	24	24	62,5	53
Cloruros	mg/l	1.40 0	2.62 5	3.00 0	2.625	2.625	2.625	2.825	2.525
Sulfatos	mg/l	ND	57,3 6	28,0 4	57,36	ND	ND	ND	8,5
Hierro	mg/l	4,64	4,44	4,72	4,44	5,6	5,9	5,16	4,8
Sodio	mg/l	980	1.80 0	1.80 0	1.800	3.639	3.639	1.538	1.343
Plomo	mg/l	0,20	0,10	0,14	0,10	0,15	0,09	0,028	0,10
Cobre	mg/l	0,20	0,16	0,20	0,16	0,24	0,4	0,28	0,20
Zinc	mg/l	0,20	0,28	0,68	0,28	0,24	0,32	0,52	0,2
Cadmio	mg/l	0,00 55	0,00 95	0,01	0,009 5	0,0095	0,019	0,006	8,5
Cromo Hexavalente	mg/l	0,22 4	0,26	0,26	0,26	0,55	0,37	0,39	0,2
Fenoles	mg/l	0,25 2	0,55 8	0,98 4	0,558	0,12	0,19	0,786	0,51
MBAS o SAAM	mg/l	2,77	1,44	2,37	1,44	1,24	1,57	2,42	2,17

Fuente: Laboratorio Consorcio ILM, 2012



**ANEXO 3:** Análisis de las características del lixiviado del relleno sanitario “Las Iguanas”, Sector D.

ANALISIS DEL RELLENO SANITARIO "LAS IGUANAS" SECTOR D - 2012								
PARAMETROS	UNIDADES	FEBRERO	MARZO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	DICIEMBRE
Potencial de Hidrogeno	Unidad de pH	7,8	7,5	7,9	7,8	7,9	7,7	8,2
Conductividad a 20 C	µs/cm	18.450	21.000	24.200	24.800	24.200	24.100	24.700
Caudal	m3/dia	748,28	684,74	507,24	578,49	515,87	540,05	625,25
Residuos sedimentales	mg/l	0,3	0,3	0,1	0	0,1	0,1	0,1
Residuos Totales	mg/l	10.100	10.100	11.491	10.803	11.491	11.491	14.469
Residuos no filtrables (suspendidos)	mg/l	115	115	37	72	37	37	135
Demanda Química de oxígeno	mg/l	3.820	2.960	3.590	4.160	3.590	7.130	3.525
Demanda Bioquímica de oxígeno	mg/l	1.100	1.100	1.161	1.569	1.161	3.127	1.342
Temperatura de la muestra	C	27,2	39,2	40,3	39,1	40,3	34,5	39,2
Dureza Total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	1.820	1.060	1.060	2.150	1.060	1.060	1.240
Dureza cálcica	mg/l CaCO <sub>3</sub>	510	260	615	670	615	615	630
Dureza magnésica	mg/l CaCO <sub>3</sub>	1.310	800	445	1.480	445	445	610
Amoniaco	mg/l CaCO <sub>3</sub>	1.108	1.173	987	987	987	839	1.452
Amonio	mg/l	1.173	1.242	1.045	1.045	1.045	888	1.537
Nitrógeno Total	mg/l	1.825	2.140	2.300	2.300	2.300	1.530	2.393
Fosforo total como PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/l	160	160	42	41	42	56,5	78
Cloruros	mg/l	3.200	0	3.025	2.975	3.025	3.025	3.525
Sulfatos	mg/l	ND	ND	5,44	29,28	5,44	nd	nd
Hierro	mg/l	3,84	1,60	2,60	2,70	2,60	2,6	2,72
Sodio	mg/l	3.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.618
Plomo	mg/l	0,25	0,12	0,050	0,035	0,05	0,08	0,006
Cobre	mg/l	0,40	0,24	0,2	0,20	0,2	0,3	0,4

Zinc	mg/l	0,024	0,28	0,36	0,36	0,36	0,44	0,36
Cadmio	mg/l	0,006	0,01	0,02	0,01	0,02	0,008	0,006
Cromo Hexavalente	mg/l	0,152	0,22	0,31	0,4	0,31	0,45	0,58
Fenoles	mg/l	0,92	1,00	1,00	1,45	1,00	0,05	0,78
MBAS o SAAM	mg/l	1,83	2,77	1,48	1,72	1,48	1,03	1,96

Fuente: Laboratorio Consorcio ILM, 2012

#### ANEXO 4. Vista Panorámica del relleno sanitario “Las Iguanas”



## **ANEXO 5.- Diseño del sistema preliminar, primario y Desinfección para el uso del reactor UASB como tratamiento secundario biológico.**

### **ANEXO 5.1 Diseño Rejilla.**

Se propone la construcción de un canal con rejilla de limpieza manual cada uno diseñado con el caudal del lixiviado del relleno sanitario

$$Q = 0.0073 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se consideran las siguientes condiciones de operación:

Velocidad mínima del agua en el canal de 0.6 m/s para evitar la sedimentación de sólidos orgánicos.

Velocidad máxima del paso del agua entre rejas de 0.75 m/s, para evitar que los sólidos retenidos sean arrastrados.

La Inclinación de las rejas de 60° con respecto a la horizontal.

Se proponen las siguientes características del emparrillado: espesor  $S = 0.005$  m y separación entre barras  $e = 0.025$  m

Donde Área es igual:

$$A = \frac{Q}{V}$$

$$A = 0.024 \text{ m}^2$$

El ancho del canal = 0.60 m (propuesto)

$$A = b \times h$$

$$h = \frac{0.024}{0.2} = 0.12 \text{ m}$$

Calculo del  $bg$  (suma de las separaciones entre barras) dado mediante la ecuación:

$$b = \left( \frac{bg}{e} - 1 \right) (S + e) + e$$

$$200 = \left(\frac{bg}{25} - 1\right)(5 + 25) + 25$$

$$bg = 0.17$$

$$\text{hipotenusa} = \frac{0.12}{\text{sen } 60^\circ} = 0.14$$

$$\text{Area libre} = \text{hipotenusa} \times bg$$

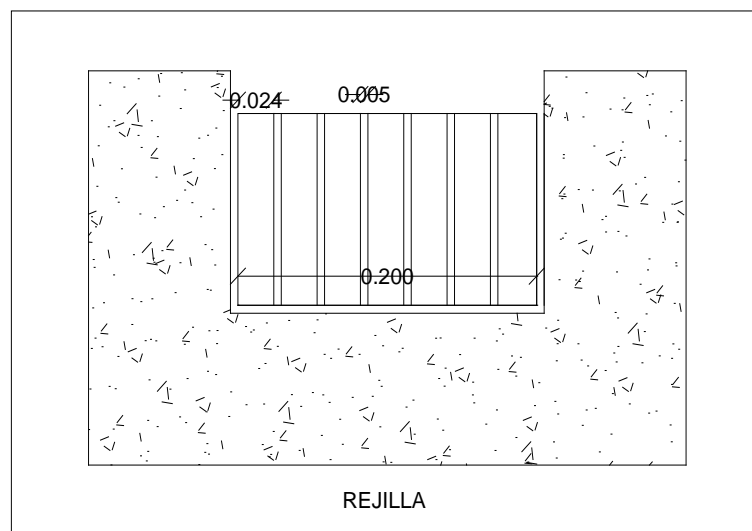
$$\text{Area libre} = 0.14 \times 0.17 = 0.023 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.0073}{0.023} = 0.30 \text{ m/s}$$

El número de barras será:

$$n = \frac{bg}{e} - 1$$

$$n = 6 \text{ ud}$$



## ANEXO 5.2. Diseño del Sedimentador Primario

Se tiene como datos:

Caudal de diseño:  $Q = 633.73 \text{ m}^3/\text{día}$

Velocidad de sedimentación:  $V_s = 28.8 \text{ m/día}$

Se determina el área superficial de la unidad ( $A_s$ ).

$$A_s = \frac{Q}{V_s}$$

$$A_s = 22.00 \text{ m}^2$$

Se asume un ancho del sedimentador  $B=3.00 \text{ m}$  y se determina la longitud de la zona de Sedimentación.

$$L = \frac{A_s}{B} = 7.33 \text{ m}$$

Se asume la distancia de separación entre la entrada y la pantalla difusora  $L_1 = 0,7 \text{ m}$

Entonces se tiene como longitud de la unidad:

$$L = L_1 + L_2 = 10.03 \text{ m}$$

Se verifica si cumple la relación de  $L/B$  de los criterios de diseño:  $L/B = 3,34$

Se asume la profundidad  $H = 1,5 \text{ m}$

Se verifica si cumple la relación  $L/H$  de los criterios de diseño:  $L/H = 6.68$

Se determina la velocidad horizontal  $V_H$ .

$$V_H = \frac{Q}{B \times H} = 0.069 \text{ cm/seg}$$

Se determina el periodo de retención:

$$\text{THR} = 1.5 \text{ horas}$$

Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad se tiene como altura máxima:

$$H' = H + 0,1H = 3.85 \text{ m}$$

Con un vertedero de salida de longitud de cresta igual al ancho de la unidad se tiene como altura de agua sobre el vertedero.

$$H_2 = \left[ \frac{Q}{1.84 \times B} \right]^{2/3} = 0.66 \text{ m}$$

Para el diseño de la pantalla difusora se tiene:

Se asume una velocidad de paso entre los orificios:  $V_0 = 0,1 \text{ m/seg}$

Se determina el área total de los orificios

$$A_0 = \frac{Q}{V_0} = 0.073 \text{ m}^2$$

Se adopta un diámetro de orificio:

$$d_0 =$$

Entonces se determina el área de cada orificio:

$$a_0 = 0,0044 \text{ m}^2$$

Se determina el número de orificios:

$$n = \frac{A_0}{a_0} = 16 \text{ orificios}$$

Se determina la porción de altura de la pantalla difusora con orificios:

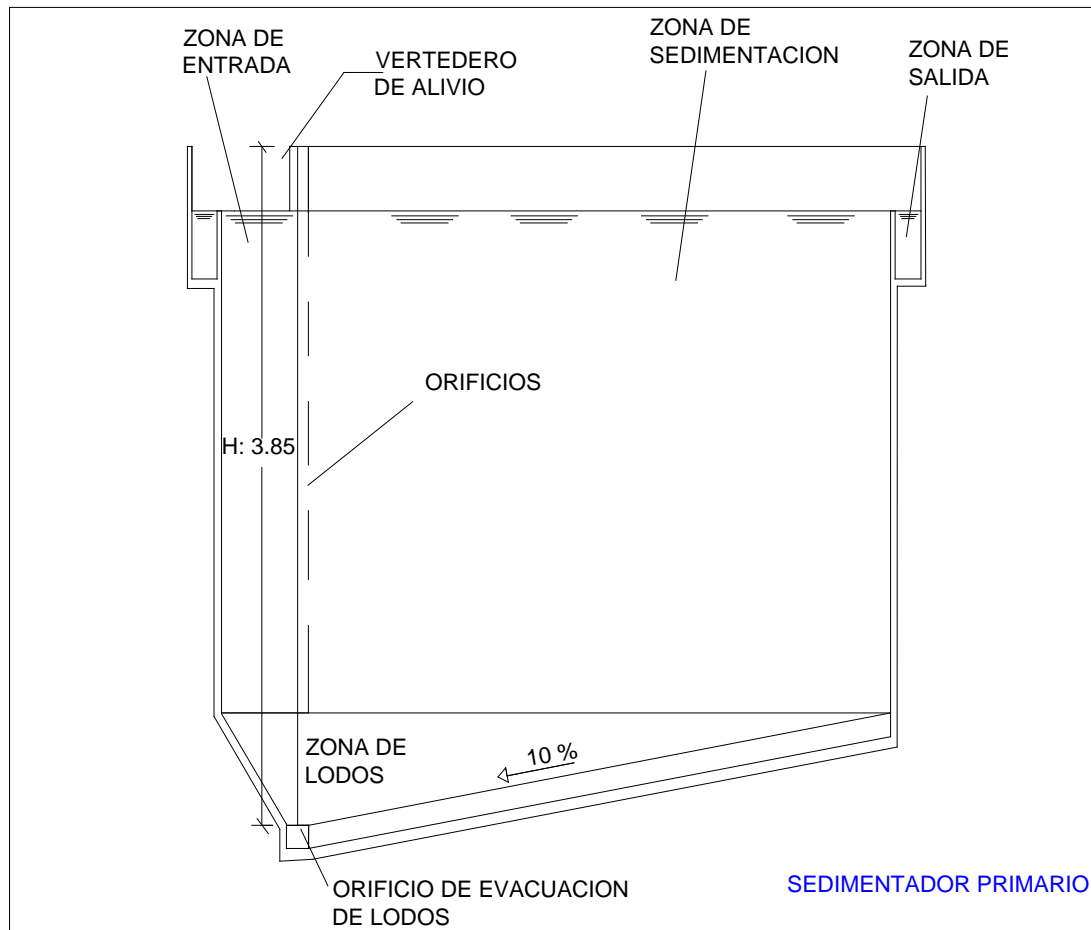
$$h = H - \frac{2}{5}H = 0.90 \text{ m}$$

Se asume un número de filas de orificios  $n_f = 4$

Entonces se tiene el número de columnas  $n_c = 4$

Se determina el espaciamiento entre filas:  $a_1 = 0.225 \text{ m}$

Se determina el espaciamiento entre columnas:  $a_2 = 0,48 \text{ m}$



### **ANEXO 5.3. Diseño del Sedimentador secundario**

Se tiene como datos:

Caudal de diseño:  $Q = 633.73 \text{ m}^3/\text{día}$

Velocidad de sedimentación:  $V_s = 28.8 \text{ m}/\text{día}$

Se determina el área superficial de la unidad ( $A_s$ ).

$$A_s = \frac{Q}{V_s}$$

$$A_s = 22.00 \text{ m}^2$$

Se asume un ancho del sedimentador  $B=2.50$  m y se determina la longitud de la zona de Sedimentación.

$$L = \frac{A_s}{B} = 8.80 \text{ m}$$

Se asume la distancia de separación entre la entrada y la pantalla difusora  $L_1 = 0,7$  m

Entonces se tiene como longitud de la unidad:

$$L = L_1 + L_2 = 9.50 \text{ m}$$

Se verifica si cumple la relación de  $L/B$  de los criterios de diseño:  $L/B = 3,80$

Se asume la profundidad  $H = 4.50$  m

Se verifica si cumple la relación  $L/H$  de los criterios de diseño:  $L/H = 2.11$

Se determina la velocidad horizontal  $V_H$ .

$$V_H = \frac{Q}{B \times H} = 0.064 \text{ cm/seg}$$

Se determina el periodo de retención:

THR =1.5 horas

Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad se tiene como altura máxima:

$$H' = H + 0,1H = 4.95 \text{ m}$$

Con un vertedero de salida de longitud de cresta igual al ancho de la unidad se tiene como altura de agua sobre el vertedero.

$$H_2 = \left[ \frac{Q}{1.84 \times B} \right]^{2/3} = 0.135 \text{ m}$$

Para el diseño de la pantalla difusora se tiene:



Se asume una velocidad de paso entre los orificios:  $V_0 = 0,1$  m/seg

Se determina el área total de los orificios

$$A_0 = \frac{Q}{V_0} = 0.073 \text{ m}^2$$

Se adopta un diámetro de orificio:

$$d_0 =$$

Entonces se determina el área de cada orificio:

$$a_0 = 0,0044 \text{ m}^2$$

Se determina el número de orificios:

$$n = \frac{A_0}{a_0} = 16 \text{ orificios}$$

Se determina la porción de altura de la pantalla difusora con orificios:

$$h = H - \frac{2}{5}H = 2.70 \text{ m}$$

Se asume un número de filas de orificios  $n_f = 4$

Entonces se tiene el número de columnas  $n_c = 4$

Se determina el espaciamiento entre filas:  $a_1 = 0.675$  m

Se determina el espaciamiento entre columnas:  $a_2 = 0,48$  m

#### **ANEXO 5.4. Diseño de desinfección**

La cantidad CF (coliformes fecales) similar a la de un efluente de tratamiento secundario se considerara un valor de:

$$CF = 10^6 \text{ NMP}/100\text{ml}$$

Donde la dosis de cloro podemos obtener por:

$$N = N_0 \left( \frac{Cr \cdot t}{b} \right)^{-n}$$

$$N_0 = 10^6 \text{ NMP}/100\text{ml}$$

$$N = (0.001)(10^6 \text{ NMP}/100 \text{ ml})$$

Donde el tiempo de contacto es:

$$t = \text{tiempo de contacto}$$

$$t = 60 \text{ min}$$

$$Cr = \frac{4 \left( \frac{100}{10^6} \right)^{-1/2.8}}{60}$$

$$Cr = 0.78 \frac{\text{mg}}{\text{lt}} \approx 1 \text{mg/lt}$$

Para el diseño del tanque de cloración se toma los siguientes parámetros

$$Q = 7.3348 \text{ l/seg}$$

Donde el tiempo de contacto es 60 min

La velocidad esta dado por un factor de hora pico de 1.50 y una área transversal del tanque de 4.50 m<sup>2</sup>

$$V = 1.50 \frac{Q}{A}$$

$$V = 0.00244 \text{ m/s}$$

Donde asumimos un ancho del tanque = 3.00 m

Altura del tanque = 1.50 m

Donde el largo del tanque es:

$$L = \frac{1.50 \times Q \times t}{\text{Area transversal}} = 8.80 \text{ m}$$

Donde la distancia recorrida es:

$$L \times (N^0 \text{ pantallas} + 1) = 70.41$$

**Volumen Resultante (m3) :**

No. De pantallas	7,00 U
Distancia	0,25 m
Espesor	0,14 m
Ancho total	2,98 m
VOLUMEN TOTAL:	39,34 m3

