

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y  
ARTES DE CHIAPAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

## **INFORME TÉCNICO**

**DIAGNÓSTICO DEL MANEJO DE LIXIVIADOS  
EN RELLENOS SANITARIOS DEL ESTADO DE  
CHIAPAS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTA:  
MONTSERRAT GUADALUPE ÁLVARO  
GUTIÉRREZ**

**DIRECTOR:  
DR. HUGO ALEJANDRO NÁJERA AGUILAR**

**CODIRECTOR:  
BIÓL. ISRAEL DOMÍNGUEZ BELLO**

**TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS**

**JUNIO 2023**





**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**  
SECRETARÍA GENERAL  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR  
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
Fecha: 15 de junio de 2023

C. Montserrat Guadalupe Álvaro Gutiérrez

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería Ambiental \_\_\_\_\_

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:  
Diagnóstico del manejo de lixiviados en rellenos sanitarios del estado de Chiapas

En la modalidad de: Informe técnico

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

**Revisores**

Dr. José Manuel Gómez Ramos

Dr. Carlos Manuel García Lara

Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar

**Firmas:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Ccp. Expediente

*Agradezco a todos quienes me apoyaron con su tiempo, su sabiduría y compañía para lograr la realización del presente trabajo.*

# ÍNDICE GENERAL

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
II.1 GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN DE LIXIVIADOS.....	8
II.2. PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS .....	9
II.3. AFECTACIONES AL AMBIENTE .....	9
II.4. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS .....	10
II.4.1. BIOLÓGICO .....	10
II.4.2. TRATAMIENTO AEROBIO .....	10
II.4.3 TRATAMIENTO ANAEROBIO.....	11
II.4.4 SISTEMAS NATURALES .....	11
II.4.5 SISTEMAS DE MEMBRANAS .....	12
II.4.6 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA) .....	12
II.5 TRATAMIENTOS APLICADOS A LIXIVIADOS ALREDEDOR DEL MUNDO .....	12
II.6 TRATAMIENTOS APLICADOS EN MÉXICO .....	13
II.7 TRATAMIENTOS APLICADOS EN EL ESTADO DE CHIAPAS .....	15
II.8 NORMATIVIDAD APLICADA A LOS LIXIVIADOS .....	18
<b>III. OBJETIVOS.....</b>	<b>21</b>
<b>IV. METODOLOGÍA.....</b>	<b>22</b>
IV.1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO .....	22
<b>V. RESULTADOS</b>	
V. 1. UBICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS EN CHIAPAS. ....	33
V.2. REVISIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS APLICADAS EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS... ..	35
V.3. COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS IMPLEMENTADAS EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS .....	36
V.4. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS A COMPARAR .....	40
V.4.1. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR LAGUNAS DE EVAPORACIÓN .....	40
V.4.3. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR UASB.....	43
V.4.4. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR SBR .....	45
<b>VI. CONCLUSIONES .....</b>	<b>48</b>
<b>VII. ANEXOS .....</b>	<b>49</b>
ANEXO A. MATRIZ DE LAGUNAS DE EVAPORACIÓN.....	49
ANEXO B. MATRIZ DE UASB .....	50
ANEXO C. MATRIZ DE LODOS CONVENCIONALES .....	51
ANEXO D. MATRIZ DE SBR .....	52
<b>VIII. REFERENCIAS .....</b>	<b>53</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> CARACTERÍSTICAS DE LOS LIXIVIADOS DEPENDIENDO SU EDAD [7-8].....	9
.....	16
<b>TABLA 2.</b> TIPOS DE TRATAMIENTO APLICADOS A LOS LIXIVIADOS EN CHIAPAS.....	26
<b>TABLA 3.</b> SISTEMAS DE MANEJO DE LIXIVIADOS EN CHIAPAS Y CONDICIONES EXISTENTES.....	27
<b>TABLA 4.</b> DIMENSIONES DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO (LAGUNAS) DE LOS RELLENOS SANITARIOS DE CHIAPAS.....	31
<b>TABLA 5.</b> TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS MENCIONADOS FRECUENTEMENTE EN LA LITERATURA.....	36
<b>TABLA 6.</b> CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS UASB, LAGUNAS Y LODOS ACTIVADOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS.....	39
<b>ANEXO A.</b> MATRIZ DE LAGUNAS DE EVAPORACIÓN.....	49
<b>ANEXO B.</b> MATRIZ DE UASB.....	50
<b>ANEXO C.</b> MATRIZ DE LODOS CONVENCIONALES.....	51
<b>ANEXO D.</b> MATRIZ DE SBR.....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> CAPTACIÓN DE LIXIVIADOS A NIVEL NACIONAL .....	14
<b>FIGURA 2.</b> TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS A NIVEL NACIONAL .....	14
<b>FIGURA 3.</b> SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RSU EN CHIAPAS.....	15
<b>FIGURA 4.</b> RS DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS .....	16
<b>FIGURA 5.</b> CLIMAS DEL ESTADO DE CHIAPAS.....	22
<b>FIGURA 6.</b> PORCENTAJE DE LLUVIAS EN CHIAPAS DEL AÑO 2021 .....	23
<b>FIGURA 7.</b> PORCENTAJE DE LOS TIPOS DE TRATAMIENTO APLICADOS A LOS LIXIVIADOS EN CHIAPAS.....	26
<b>FIGURA 8.</b> CONDICIONES DE OPERACIÓN (EN %) DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE LIXIVIADOS EXISTENTES EN CHIAPAS.....	28
<b>FIGURA 9.</b> LAGUNA DE CHANAL .....	29
<b>FIGURA 10.</b> LAGUNA DE CHIAPILLA .....	29
<b>FIGURA 11.</b> LAGUNA DE COMITÁN .....	29
<b>FIGURA 12.</b> LAGUNA DE ESCUINTLA.....	29
<b>FIGURA 13.</b> LAGUNA DE BENITO JUÁREZ LA CONCORDIA .....	29
<b>FIGURA 14.</b> LAGUNA DE MARQUÉS DE COMILLAS .....	29
<b>FIGURA 15.</b> LAGUNA DE OCOZOCOAUTLA .....	30
<b>FIGURA 16.</b> LAGUNA DE PALENQUE.....	30
<b>FIGURA 17.</b> LAGUNA DE TUXTLA GUTIÉRREZ .....	30
<b>FIGURA 18.</b> HUMEDAL DE HUTTIUPÁN .....	31
<b>FIGURA 19.</b> MAPA DE LA UBICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS EN CHIAPAS .....	33
<b>FIGURA 20.</b> MAPA DE LA UBICACIÓN SEGÚN LA ZONA CLIMÁTICA DE LOS TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS EN CHIAPAS.....	34

## Abreviaturas

AGV: Ácidos Grasos Volátiles

ANNAMOX: Oxidación Anaerobia del Ion Amonio

BEME: Biorreactor Empacado con Material Empacado

CONAGUA: Comisión Nacional De Agua

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

EGSB: Reactor de Manto de Lodo Granular Expandido

IB: Índice de Biodegradabilidad

ME: Material Empacado

NOM: Norma Oficial Mexicana

POA: Procesos de Oxidación Avanzada

RS: Relleno Sanitario

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

SBR: Reactor Biológico Secuencial

SDF: Sitio de Disposición Final

SEMARNAT: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SEMAHN: Secretaria de Medio Ambiente e Historia Natural

SST: Sólidos Suspendidos Totales

SSV: Sólidos Suspendidos Totales

TCA: Tiradero a Cielo Abierto

UASB: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

## I. INTRODUCCIÓN

La demanda de recursos en la sociedad se ha hecho cada vez mayor, en parte por el incremento del consumo de productos básicos necesarios para subsistir, pero también por la compra de productos que no son imprescindibles. Después de la “vida útil” de lo que consumimos, se generan residuos, los cuales están relacionados con la problemática de la contaminación del medio ambiente.

Usualmente los residuos son llevados a los sitios de disposición final (SDF), en donde son dejados de manera definitiva. Los SDF pueden ser rellenos sanitarios (RS), sitios controlados o los tiraderos a cielo abierto (TCA). Contrario a lo que se piensa, la solución a los problemas de contaminación por residuos no se termina en su disposición final, sino que pueden acentuarse cuando fluyen en estos sitios diversas condiciones propicias (lluvia, cantidad y composición de los residuos, características del suelo, etc.), que llegan a potenciar una mayor generación de subproductos contaminantes (biogás y lixiviados) que pueden “escapar” de los vertederos y causar graves afectaciones al entorno cercano. Los impactos ambientales de mayor consideración en los SDF son aquellos de consecuencias a mediano y largo plazo, los cuales están, fundamentalmente, relacionados con los gases de vertedero y el lixiviado que se genera en ellos[1]. Para el caso de los lixiviados su composición es variable ya que dependen de los residuos encontrados en el vertedero. No existe una composición específica para todos los lixiviados producidos, por ende, tampoco hay una tecnología que pueda ser aplicada de manera general, ya que además de que los lixiviados tienen una composición distinta, las condiciones ambientales y climatológicas del lugar donde se encuentran, también interfieren en el desempeño de estas tecnologías. Los lixiviados presentan un elevado contenido de materia orgánica, por lo que son considerados el agua residual más contaminada. Para el manejo de lixiviados existen diversas tecnologías que se pueden aplicar, desde físicas, químicas o biológicas. Entre los procesos biológicos podemos encontrar a los tratamientos aerobios y anaerobios. Se tienen también los tratamientos por sistemas naturales, como las lagunas de estabilización y humedales artificiales, los cuales se han aplicado como alternativas para el tratamiento de lixiviados. Una de sus principales ventajas es 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 [2]. El tener el conocimiento de las tecnologías que puedan implementarse para el tratamiento de lixiviados, puede permitir tomar mejores decisiones en el manejo de estos líquidos que son altamente contaminantes y que se producen constantemente en los SDF.

Los lixiviados pueden filtrarse desde los SDF a los cuerpos de agua superficiales, como son ríos o lagos, incluso llegar hasta las corrientes de las aguas subterráneas, causando severos daños a estos.



Desafortunadamente, en países como México, el tratamiento practicado a los lixiviados cuando éste se lleva a cabo, puede ser cuestionable, dado que la evaporación y recirculación no son las más adecuadas para regiones de alta precipitación pluvial [3]. En el caso del estado de Chiapas, los TCA es la forma más común de disponer los residuos, alejado totalmente del cumplimiento de la normativa mexicana, donde los problemas por generación de lixiviados y producción de biogás se acentúan, sin mencionar los efectos por fauna nociva, calidad paisajística, arrastre de materiales ligeros, incendios, entre otros, que acompañan esta práctica desafortunada de disposición final.

De acuerdo a la normatividad mexicana existen los denominados rellenos sanitarios. Esta forma de disponer los residuos es la más aceptada en el territorio nacional, al minimizar los impactos al entorno, sin embargo, el tratamiento que se le brinda a los lixiviados en estos sitios, sigue distando de representar un tratamiento propio. Entonces, cualquier acción encaminada al tratamiento y manejo adecuado de estos líquidos, como puede ser la generación de la etapa a nivel diagnóstico sobre su manejo, podrá abonar a disminuir la problemática que los lixiviados representan en la actualidad y ser el punto de partida en la toma de decisiones futuras. Es así que en el presente documento se busca realizar un diagnóstico sobre la situación del manejo de lixiviados en SDF de residuos sólidos en el estado de Chiapas, teniendo como apoyo la revisión de la literatura y la información proporcionada por la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural (SEMAHN), por último, se pretende recomendar las alternativas que pudieran tener mayor viabilidad en su implementación, cuidando siempre el binomio economía-eficiencia.

## II. MARCO TEÓRICO

### II.1 GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN DE LIXIVIADOS

La lluvia, fuente de escurrimientos superficiales y subterráneos, al escurrir y filtrarse entre los residuos presentes en los SDF, aunado a la humedad de los residuos, contribuyen a producir los denominados lixiviados. Estos líquidos arrastran a su paso material disuelto, en suspensión, fijo o volátil, dándoles colores desde el café- pardo grisáceo hasta el negro[4]. En cuanto a la cantidad de lixiviados producidos dependerá de tres variables principales: el área rellenada, la cantidad de infiltración y el sistema de drenaje e impermeabilización. El área rellenada afecta porque es a través de ella que se realiza la entrada y el contacto del agua de infiltración con los residuos [5]. La composición de estos líquidos es variable ya que dependen del tipo de residuos que se encuentran en los SDF, del tiempo en el que se encuentran retenidos y de las reacciones químico-biológicas que se llevan a cabo en estos sitios. Pueden estar compuestos tanto de materia orgánica como de materia inorgánica. Dentro del mismo lugar de disposición final también hay diferencias entre los lixiviados producidos, esto se debe al tiempo que llevan los residuos depositados. Se pueden encontrar lixiviados jóvenes (menos de 5 años), intermedios (de 5 a 10 años) y viejos (más de 10 años). Los lixiviados jóvenes son los que más contaminantes en comparación con los viejos, ya que las concentraciones de sales disueltas y metales pesados son mucho mayores en ellos, cuando ocurren procesos biológicos [5]. No existe una composición general para todos los líquidos producidos, sin embargo, según Torres [6], se presentan algunos componentes, segregados en cuatro grupos: materia orgánica disuelta, macronutrientes orgánicos, metales pesados y los compuestos xenobióticos. Por lo antes expuesto, al momento de seleccionar el sistema de tratamiento que debe ser aplicado al lixiviado, será importante conocer el tipo de lixiviado a tratar, dado que su composición influye en la eficiencia del sistema de tratamiento implementado. También es importante considerar la cantidad de lixiviados producidos. En la tabla siguiente (Tabla 1) se puede apreciar la comparación de algunas características de los lixiviados dependiendo su edad en el relleno.

**Tabla 1.** Características de los lixiviados dependiendo su edad [7-8].

Tipo de lixiviado	Joven	Intermedio	Viejo
Edad (años)	<5	5 a 10	>10
pH (-)	6.5-7.5	7.0-8.0 (7.5)	7.5-8.5 (8)
DQO (g/l)	10-30(15)	3-10 (5)	<3(2)
DBO/DQO (-)	0.5-0.7(0.6)	0.3-0.5 (0.4)	<0.3(0.2)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/l)	500-1000(700)	800-2000(1000)	1000-3000(2000)
DQO/ NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	5-10(6)	3-4(3)	<3(1.5)
Sustancias suspendidas (mg/l)	1875	386-1950	159 -1150
Sustancias suspendidas totales (mg/l)	4.6 - 6.8	848 - 6786	767 - 6786
Nickel (mg/l)	-	0.02 -1.56	0 - 1.56
Cadmio(mg/l)	-	0 - 0.13	0 - 0.05
Plomo (mg/l)	-	0 - 3.25	0 - 3.45
Cromo(mg/l)	-	0.05 - 16.9	0.04 - 1.16
Mercurio (mg/l)	-	0.4 - 1.70	-

## II.2. PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS

Para calcular la producción de lixiviados, existen diversos modelos matemáticos que nos permiten obtener una cantidad aproximada del lixiviado producido durante un tiempo definido. Algunos de estos modelos son los siguientes: Thornthwaite, Modelo suizo, Modelo Fenn, Modelo Bagchi y el Balance de agua en serie.

## II.3. AFECTACIONES AL AMBIENTE

El escape de lixiviados provoca un riesgo de contaminación del agua por lixiviados que, por lo general, contienen residuos considerados como peligrosos de acuerdo con la normatividad mexicana[7]. Los metales pesados pueden estar presentes en el lixiviado. Si el lixiviado contiene coloides, entonces el mayor riesgo es que metales pesados, como cadmio, cobre, plomo y cromo, se transporten fuera del vertedero, así como los contaminantes orgánicos, que pueden ser cancerígenos, tóxicos y mutagénicos [8]. Estos metales pueden llegar hasta el suelo y a las aguas cercanas al SDF, al ser acarreados por los mismos lixiviados de vertederos lo que puede provocar la degradación al ambiente y riesgos a la salud humana.

## **II.4. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS**

Al igual que la composición de los lixiviados, los tipos de tratamientos son muy diferentes entre sí. Las alternativas de tratamiento de lixiviados se pueden clasificar de acuerdo a diferentes características como por ejemplo, dependiendo de los niveles de tratamiento que se logren con cada una de ellas, o por el tipo de contaminación que puedan remover [2]. Una vez que los lixiviados han sido recolectados, estos son almacenados para su posterior tratamiento. En la selección y diseño del sistema de tratamiento de lixiviados, es necesario conocer su volumen y carga contaminante, además de otros aspectos como: características físicas del lugar, disponibilidad económica y de suministro de energía, y personal calificado para operar la tecnología [1]. A continuación, se presentan algunos tipos de tratamiento de lixiviados existentes:

### **II.4.1. BIOLÓGICO**

En este tipo de procesos son utilizados microorganismos que pueden degradar la materia orgánica contenida en el líquido y a partir de esto obtener biomasa y biogás. Estos son generalmente aplicados a lixiviados jóvenes, ya que tienen un alto índice de biodegradabilidad. El proceso requiere una identificación cuidadosa de las bacterias degradantes antes de su implementación. Generalmente, también se requiere un monitoreo constante de la actividad microbiana para asegurar una actividad microbiana constante y consistente durante todo el proceso de degradación [9]. Los microorganismos pueden ser anaeróbicos o aeróbicos y necesitar de diversos nutrientes para su debido crecimiento y reproducción. A continuación, se mencionan aspectos y conceptos generales de los principales sistemas de tratamiento.

### **II.4.2. TRATAMIENTO AEROBIO**

Su implementación es sencilla, sin embargo, es necesario mantener la presencia de oxígeno, por lo cual los tanques de depuración necesitan ser agitados y también debe cuidarse un pH y cantidad de nutrientes que puedan mantener con vida a los microorganismos. Se puede llegar a aplicar un tratamiento aerobio mediante el uso de lagunas aireadas, sistemas de lodos activados, sistemas biológicos de discos rotatorios, filtros percoladores, entre otros sistemas [2]. Este tipo de tratamiento consume energía para poder funcionar y su principal residuo son los lodos.

### **II.4.3 TRATAMIENTO ANAEROBIO**

La degradación de la materia orgánica se lleva a cabo en condiciones anaeróbicas en donde la producción de lodos es baja, el tratamiento es simple por lo cual tiene costos bajos. Este tipo de tratamiento es aplicado generalmente cuando el lixiviado tiene altas concentraciones de materia orgánica. Algunos sistemas anaerobios son, los filtros anaerobios y los reactores UASB. Después del pretratamiento, el tratamiento anaerobio es usualmente utilizado como primera etapa dentro del tren de tratamiento y en ocasiones puede ser utilizado como pretratamiento antes de que los lixiviados pasen a un sistema aerobio [9]. Es recomendable que el lixiviado antes de pasar por el reactor anaerobio, sea previamente tratado, para que no se acumulen precipitados inorgánicos en el fondo de los reactores. Una de las características de este tratamiento es que no necesita de energía para su funcionamiento y produce metano el cual puede aprovecharse como fuente de energía

### **II.4.4 SISTEMAS NATURALES**

Estos son menos costosos en comparación con otros tipos de procesos y funcionan de manera simple. Entre estos sistemas tenemos a los humedales artificiales y las lagunas; para los primeros es necesario tener un terreno lo suficientemente grande para su instalación, en ellos se puede llevar a cabo diversos tipos de tratamiento, ya sea primario, secundario, terciario o inclusive el pre-tratamiento. Los humedales artificiales son sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales que, reproduciendo un ambiente húmedo, pueden realizar fitodepuración [10], se clasifican dependiendo de la circulación del agua, como: humedales de flujo libre, flujo subsuperficial horizontal y flujo subsuperficial vertical. Para el caso del sistema a base de lagunas el lixiviado es tratado por medio de la evaporación. Este tipo de sistema es ampliamente utilizado en países en desarrollo puesto que se han considerado como un sistema eficiente para la remoción de patógenos y de materia orgánica e inorgánica, además de tener un bajo costo de mantenimiento y operación [11]. Este tratamiento consiste en la retención de los lixiviados en las lagunas, en donde se lleva a cabo un proceso de autopurificación por medio de la actividad bacteriana y de las algas [12]. El requerimiento de grandes extensiones de terreno y la dependencia de las condiciones ambientales como la radiación y la temperatura son una de las desventajas para este tipo de tratamiento. Es importante destacar que si se proyecta cualquiera de estas tecnologías (humedales artificiales o sistema de lagunas), generalmente serán empleadas como etapa de depuración, o bien, como etapa de pretratamiento, pero no como una tecnología única de tratamiento, dada la alta carga contaminante que acompaña a los lixiviados.

#### **II.4.5 SISTEMAS DE MEMBRANAS**

En este tipo de tratamiento se utilizan los procesos de ósmosis inversa, ósmosis directa, microfiltración, nanofiltración, entre otros. Los biorreactores con membrana están conformados por una membrana en donde los lixiviados se filtran separando el líquido del sólido a través del sistema de microfiltración, nanofiltración o ultrafiltración. Las ventajas de este tratamiento son la baja sensibilidad a cambios en las características del lixiviado, capacidad para controlar fácilmente la edad del lodo, producción reducida de lodo y requisitos de espacio limitados [10], pero tiene como desventaja, costos de inversión y de mantenimiento elevados.

#### **II.4.6 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)**

Son procesos fisicoquímicos que involucran la generación y uso de especies transitorias altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{HO}\bullet$ ) que posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica. Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos o por otras formas de energía, suministrando un incremento en la velocidad de reacción en el tratamiento de agua contaminada [2].

Estos tratamientos son normalmente utilizados para tratar lixiviados viejos, ya que estos tienen bajo índice de biodegradabilidad. Otros ejemplos de tratamiento fisicoquímicos son la oxidación química, precipitación química, la coagulación/floculación, entre otros. Estas tecnologías serán recomendables aplicarlas como etapas de depuración final, cuando la carga orgánica en los lixiviados sea inferior a los 5,000 mg/L de DQO, buscando no elevar demasiado los costos de operación como de producción de lodos.

#### **II.5 TRATAMIENTOS APLICADOS A LIXIVIADOS ALREDEDOR DEL MUNDO**

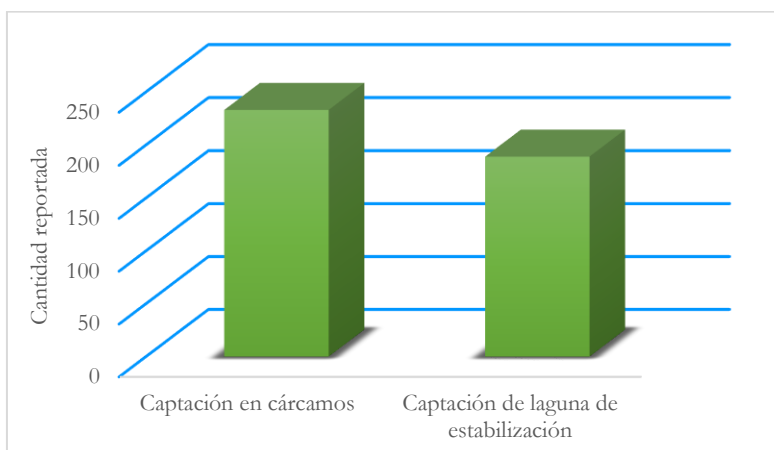
Como se mencionó anteriormente los lixiviados tienen diversos compuestos, esto depende de cada relleno. Por ejemplo, la concentración de contaminantes en los lixiviados de Estados Unidos y Europa es más baja que en los países asiáticos [13]. Para el caso de lixiviados producidos en países en vías de desarrollo, estos presentan concentraciones mayores de DBO, amoníaco, metales y sustancias precipitables en comparación con los lixiviados de los países desarrollados [5]. En el tratamiento de lixiviados, de acuerdo a lo reportado por Zafra & Torres [14], en su trabajo indican que en Iberoamérica los tratamientos más utilizados son los biológicos y fisicoquímicos, y dentro de los primeros, a nivel mundial son los lodos activados en combinación con el agua residual, las tecnologías mayormente implementadas para la depuración de lixiviados. Por otro lado Bove et al. [10], realizaron un estudio de

revisión sobre la aplicación de los sistemas biológicos en la depuración de lixiviados en varios países, en donde las lagunas son mayormente implementadas por su bajo costo de operación, sin embargo no son la mejor opción para tratar lixiviados. En el trabajo afirman que el tratamiento ideal debe garantizar eficiencias de remoción de DQO y nitrógeno, el sistema ANAMMOX (oxidación anaerobia del ion amonio) por sus siglas en inglés, parece ser el que cumple estas condiciones si se combina con sistemas que remueven la DQO, pero esto incrementa los costos. Por lo que recomiendan hacer un análisis riguroso para el tratamiento que se pretende aplicar en determinado lugar. Dahlan [15], hizo una comparación con tres casos de estudio para países de Europa y Asia; en Turquía, en el relleno sanitario de Komurcuoada, con 4,500 ton/d de residuos recibidos, los lixiviados son tratados por una unidad de remoción de amoniaco, sedimentación aeróbica/anóxica y membranas de ultrafiltración y de nanofiltración. En el caso del relleno de Nanthaburi en Tailandia, se reciben más de 800 ton/día de residuos y los lixiviados son tratados por una unidad de coagulación, filtración de arena a presión, microfiltración y con membranas de osmosis inversa. Por último, en el relleno de Bukit Tagar, Malasia, con 3000 toneladas de residuos, los lixiviados son tratados con reactores secuenciales Batch, por una unidad de flotación por aire disuelto y lechos. De estos tres sitios, todos cumplen con los límites de descarga, a excepción del relleno de Malasia que no cumple con el límite para la DQO. Los tres cuentan con un tratamiento biológico, dos sitios cuentan con tratamiento por membranas a pesar de que las características del lixiviado sean diferentes en cada sitio. Lo reportado es este estudio sin duda es interesante, porque deja ver la complejidad que envuelve a los lixiviados en cuanto a su nivel de contaminantes, lo que se refleja en trenes de tratamiento que deben ser acoplados no solo a dos etapas medulares, sino hasta incluso tres etapas medulares dentro del tren de tratamiento para alcanzar los niveles de calidad deseados en el efluente final.

## **II.6 TRATAMIENTOS APLICADOS EN MÉXICO**

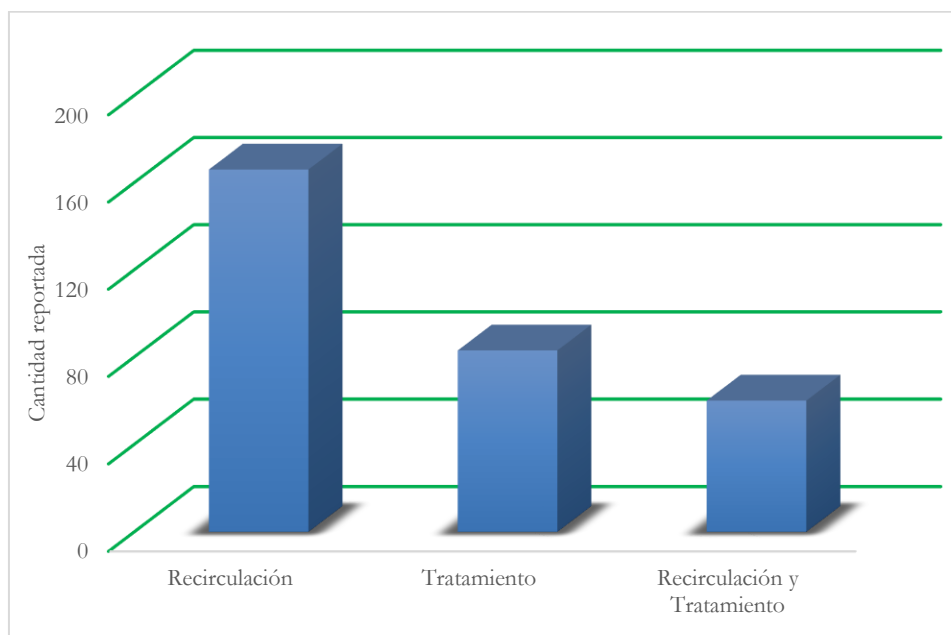
Según el diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos de la SEMARNAT [16], 359 sitios 16.30% cuentan con infraestructura para la captación y tan solo un 25% (91 sitios) con tratamiento de lixiviados. Por otro lado igualmente la SEMARNAT[17], en la clasificación de SDF de RSU por sistemas de captación y extracción de lixiviados se tiene que los lixiviados son captados de dos formas, tal y como lo indica la Figura 1.

**Figura 1.** Captación de lixiviados a nivel nacional



Prácticamente ambas captaciones se utilizan casi con la misma frecuencia, para cárcamos en total son 233 y por lagunas 189, teniendo poca diferencia entre los dos. En la Figura 2, se puede apreciar la cantidad de “tratamientos” existentes a nivel nacional.

**Figura 2.** Tratamiento de lixiviados a nivel nacional [17]



Entre los tratamientos más utilizados en el país encontramos a las lagunas de evaporación, la cual consiste en buscar la evaporación del agua para reducir el volumen del lixiviado alojado en la laguna. Generalmente acompañado de la laguna de evaporación, se encuentra la recirculación de lixiviados. La recirculación de

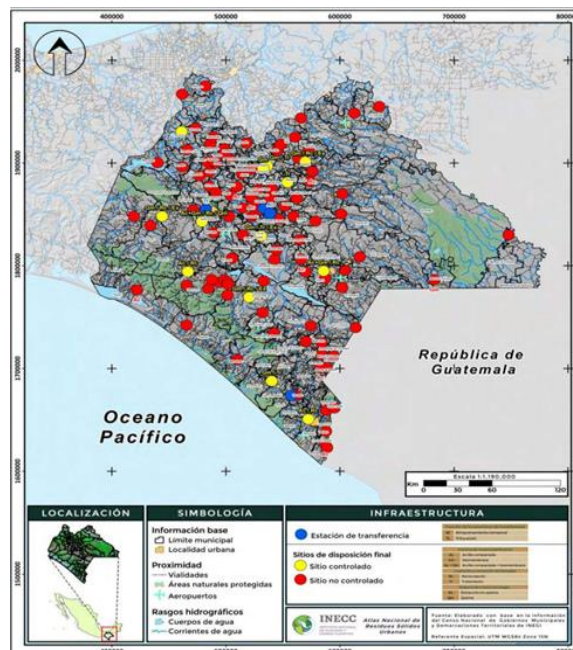


lixiviados por sí sola, según la figura anterior representa alrededor de un 54% de los tratamientos a nivel nacional, esta actividad puede ser recomendable para épocas de estiaje y cuando las precipitaciones pluviales en el lugar sean inferiores a los 1,000 mm anuales. Esto deja ver que, en muchas regiones del estado de Chiapas, donde las precipitaciones anuales alcanzan los 1500, 2000, 2500 e incluso arriba de 3000 mm, la operación de recirculación de lixiviados a las plataformas de las celdas, llega a ser una actividad no recomendable ni viable, por lo que debe pensarse en la implementación de una tecnología real de tratamiento. Otro detalle a cuidarse en la recirculación, que desafortunadamente no se atiende en la mayor parte de los rellenos sanitarios de México, es la forma de recircular los líquidos, los cuales debieran ser inyectados en pozos construidos ex profeso para ello y no en pozos construidos para el manejo y control del biogás, tampoco recircularlos directamente en las plataformas de residuos del relleno sanitario [6].

### II.7 TRATAMIENTOS APLICADOS EN EL ESTADO DE CHIAPAS

Chiapas cuenta con un total de 108 SDF, de los cuales, según el Atlas Nacional de Residuos, ninguno cumple con lo estipulado en la NOM-083 SEMARNAT-2003. En la figura 3, se puede observar con puntos rojos la cantidad de SDF no controlados y algunos puntos en amarillo que representan los SDF controlados

**Figura 3.** Sitios de disposición final de RSU en Chiapas[18].



En la figura 4 se representa la infraestructura existente en el relleno sanitario de la ciudad capital de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez. En donde el punto con el número “15”, señalado con la flecha azul, representa la laguna de evaporación implementada para el manejo de lixiviados y también se puede apreciar la zona clausurada del relleno.

**Figura 4.** RS de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas[19].



La problemática con el tratamiento ineficiente de los lixiviados en el estado de Chiapas, no ha pasado desapercibido, ya que se han realizado diversos estudios con respecto al tema. En donde se han puesto a prueba diversas tecnologías que podrían implementarse para el tratamiento de lixiviados. Entre ellos tenemos los siguientes ejemplos:

Se probó la Coagulación-Floculación para tratar el lixiviado producido en la zona clausurada del relleno de Tuxtla Gutiérrez, esto de acuerdo con lo reportado por Nájera et al [20], donde primero realizaron la caracterización del lixiviado, el cual tenía índice de biodegradabilidad menor a 0.3, por lo que se trataba de un lixiviado maduro. Como coagulante emplearon cloruro férrico ( $FeCl_3$ ) y sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ), siendo el cloruro férrico el que obtuvo una mayor eficiencia de remoción.

En otro estudio utilizando el mismo proceso de tratamiento (coagulación-floculación), los autores trataron el mismo tipo de lixiviado, pero bajo un sistema acoplado, primero se trató con el proceso de coagulación-floculación, seguido del proceso Fenton. Bajo este sistema acoplado Coagulación-

Floculación-Fenton se demostró que puede lograrse una remoción del 90% en la carga orgánica medida como DQO [21].

Bautista y colaboradores [22], aplicaron el proceso Fenton a un influente previamente tratado con un biorreactor semiaerobico. El lixiviado provenía del RS de Tuxtla Gtz. El diseño experimental que realizaron era de 3<sup>2</sup> con un total de nueve tratamientos, siendo el tratamiento con una relación molar [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]/ [Fe<sup>2+</sup>] de 2 y con un pH 3.5, el que tuvo la mayor eficiencia en DQO (78.97%). Con estos resultados, los autores demostraron que el Proceso Fenton puede ser una alternativa viable como depuración final para el tratamiento de lixiviados.

Un sistema biológico relativamente reciente aplicado al tratamiento de lixiviados, es el relacionado con la tecnología denominada Biorreactor Empacado con Material Estabilizado (BEME). En este sistema el material estabilizado (ME) es utilizado como empaque de los biorreactores, el ME, es basura vieja que ha estado por lo menos ocho años dispuesta en un RS y que contiene un amplio espectro de microorganismos con la capacidad para remover diversos contaminantes [23].

En Chiapas se han hecho estudios del desempeño de los BEME en el tratamiento de lixiviados, Lozano en el 2016[24], presenta una de las primeras investigaciones a nivel nacional. El biorreactor fue alimentado bajo una carga hidráulica de 10-11 L/m<sup>3</sup> día por un tiempo de 35 semanas. Obtuvieron una remoción de 60-90% para DQO y para el color en promedio un 60% de remoción.

Un año después Bautista et al [25], evaluaron el desempeño de otro sistema BEME para el tratamiento de lixiviados, usando biorreactores construidos en tubos de PVC de 20 cm de diámetro y 2.3 m de altura. El monitoreo lo realizaron durante 12 semanas. Los mejores resultados fueron obtenidos bajo una carga hidráulica de 50 L/m<sup>3</sup> día con remociones promedio de 80% en DQO y 87.5 % para el parámetro de color. Estos mismos autores reportan en el 2018 [26], la evaluación de otro sistema BEME para tratar el lixiviado. La eficiencia de remoción promedio del sistema fue de 83% para la DQO, 83% de DBO<sub>5</sub> y 98% de color. En este estudio se encontró que la remoción de metales pesados era menor a los límites máximos permisible establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Toalá en el 2019 [27], realizó un estudio empleando el sistema de biorreactor en serie BEME para el tratamiento de lixiviados en el relleno de Tuxtla Gutiérrez. El material estabilizado (ME) se obtuvo el del SDF de Berriozábal y del RS de Tuxtla Gtz., Chiapas. En el estudio se utilizaron dos cargas hidráulicas (25 y 40 L/m<sup>3</sup> día), siendo la primera la que brindó una mayor remoción en DQO (86%). Este estudio

nos permite ver la viabilidad de que se aprovechen los mismos residuos dispuestos en los SDF para el tratamiento de lixiviados.

Otro estudio es el realizado por Pérez [28], quien utilizó ME de los SDF de Berriozábal y de Tuxtla Gtz. Las mayores remociones fueron de 86.06, 97.94 y 97% para los parámetros de DQO, color y DBO<sub>5</sub>, respectivamente.

Una variante del sistema BEME, es el estudio reportado por Fabian [29], quien evaluó el desempeño de biorreactores empacados con 50 % de ME y con 50% de otros sustratos como unicel, caucho, piedra volcánica y vermicomposta. Los biorreactores eran de PVC con 16 cm de diámetro y 150 cm de altura. El biorreactor con resultados más estables y favorables fue el empacado con ME y vermicomposta, alcanzando una remoción promedio de 42% en DQO y 68% en color.

## **II.8 NORMATIVIDAD APLICADA A LOS LIXIVIADOS**

En México se tienen las siguientes leyes y normas las cuales deben ser aplicadas con respecto al manejo de lixiviados:

Leyes federales

En los siguientes capítulos y artículos de las leyes, se mencionan aquellos que establecen la prevención de la contaminación del agua y el suelo, dentro de las cuales el lixiviado puede ser considerado como fuente de contaminación y la cual necesita un tratamiento adecuado.

- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente [30].

Capítulo III Prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos

Artículo 121.- No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.

Artículo 123.- Todas las descargas en las redes colectoras, ríos, acuíferos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos, deberán satisfacer las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, y en su caso, las condiciones particulares de

descarga que determine la Secretaría o las autoridades locales. Corresponderá a quien genere dichas descargas, realizar el tratamiento previo requerido.

Capítulo IV Prevención y Control de la Contaminación del Suelo, se establece en el artículo

Artículo 136.- Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:

La contaminación del suelo

Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos

Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación.

Riesgos y problemas de salud.

Artículo 139. Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos[31].

Título sexto. De la prevención y manejo integral de RSU Y RME.

Artículo 97. Las NOMs establecerán los términos a que deberán sujetarse la ubicación de los sitios, diseño, construcción y operación. Las normas especificarán las condiciones que deben reunir las instalaciones y los tipos de residuos que puedan disponerse en ellas, para prevenir la formación de lixiviados y la migración de éstos fuera de las celdas de confinamiento.

Normas Oficiales Mexicanas

NOM-083-SEMARNAT-2003 [32].

Establece que los encargados del manejo de un relleno sanitario deben realizar un monitoreo de los lixiviados producidos. En la norma se establece lo siguiente:

Monitoreo de lixiviados

Se debe elaborar un programa de monitoreo de lixiviados, que tenga como objetivo estimar el volumen de generación y conocer sus características de Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO), metales pesados y medir

el tirante de líquidos acumulados respecto al nivel de desplante de la celda. Cada uno de estos parámetros tendrá una frecuencia de medición de al menos una vez al año, mientras que, para el tirante de líquidos dentro de la celda, la medición se hará mensualmente.

#### NOM-001-SEMARNAT-2021[33]

En el caso del tratamiento de lixiviados, aunque a la fecha no existe una norma como tal aplicable a estos líquidos, la literatura toma como referencia el cumplimiento de acuerdo a lo estipulado en la NOM-001-SEMARNAT-2021, con respecto a los límites permisibles de los contaminantes que se puedan encontrar en el caudal que será descargado en los cuerpos de agua.

### **III. OBJETIVOS**

#### Objetivo general

Realizar un diagnóstico del manejo de los lixiviados producidos en los rellenos sanitarios del estado de Chiapas y evaluar alternativas para su tratamiento.

#### Objetivos específicos

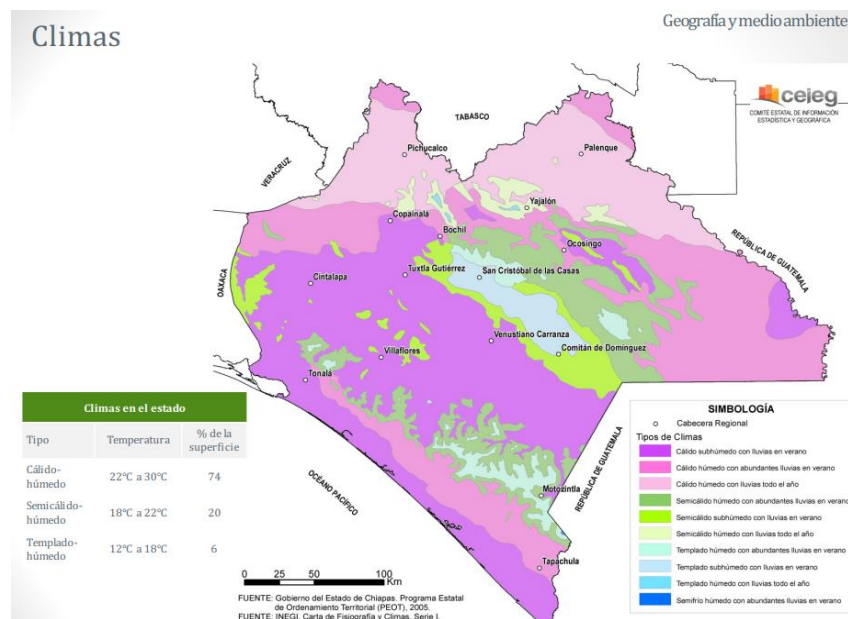
- Hacer una revisión documental del manejo dado a los lixiviados en los rellenos sanitarios del estado de Chiapas.
- Comparar la eficiencia de diversas tecnologías reportadas en la literatura para el tratamiento de lixiviados, y recomendar las que más se adapten al contexto económico y social del estado, partiendo de un análisis de diversos factores a través de la elaboración de matrices de decisión.
- Generar un mapa de la ubicación de los sistemas de tratamiento de lixiviados existentes en la entidad.

## IV. METODOLOGÍA

### IV.1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO

Chiapas se encuentra ubicado al sureste del territorio mexicano, su área representa el 3.8% de la superficie total de México. Chiapas está dividido en siete regiones fisiográficas, las cuales son: la llanura costera del pacífico, la sierra madre de Chiapas, la depresión central, altos de Chiapas, las montañas del oriente, las montañas del norte y la llanura costera del golfo, la mayor parte del estado está constituido por sierras, lo que se refleja en las diversas altitudes en el estado. El estado se caracteriza por tener una gran biodiversidad y diversidad de climas, según datos del INEGI [34], el 54% del territorio presenta un clima Cálido-Húmedo, el 40% clima Cálido-subhúmedo, el 3% Templado húmedo y el 3% restante cuenta con un clima Templado subhúmedo. Esto puede observarse en la figura 5.

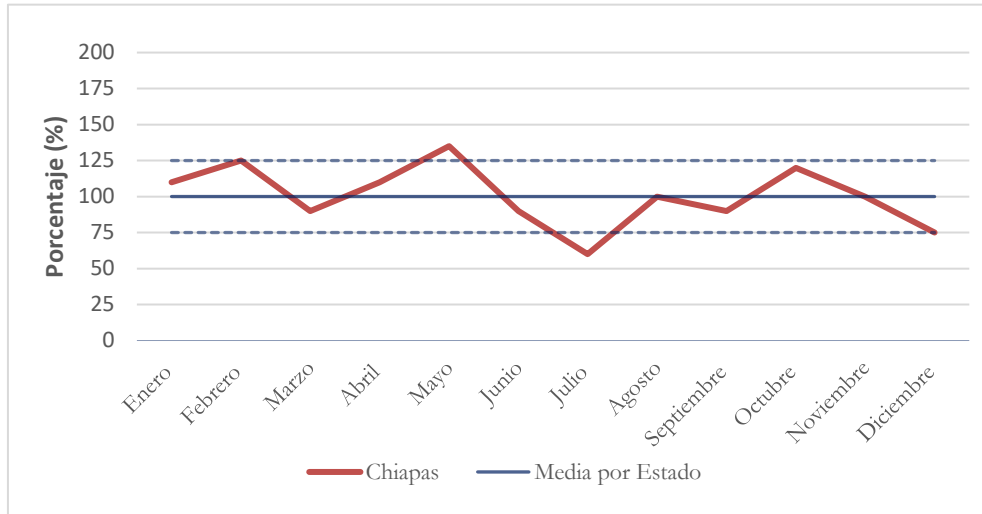
**Figura 5.** Climas del estado de Chiapas, Fuente CEIEG[35]



En la figura 6, se presenta una gráfica del porcentaje de lluvias mensuales de Chiapas en el 2021. En comparación con la media por estado, las lluvias en Chiapas generalmente superan la media por estado, pero se mantienen dentro del rango de 75-125 por ciento de lluvias.



**Figura 6.** Porcentaje de lluvias en Chiapas del año 2021. Elaboración propia con información de CONAGUA [36]



La investigación realizada es cualitativa, ya que la revisión de la información fue bibliográfica; para el primer objetivo se recopiló información en fuentes primarias y secundarias:

#### Recopilación de información en fuentes primarias

- Se recopiló información proporcionada por la SEMAHN en el rubro de los residuos sólidos respecto a:
  - a) Tipos de tratamiento con los que cuentan los rellenos sanitarios en el manejo de lixiviados.
  - b) Cantidad de lagunas existentes
  - c) Ubicación de los sistemas de tratamiento
  - d) Condiciones en las que se encuentran los sistemas

Una vez recopilada la información, esta se plasmó en gráficas y tablas, lo anterior con la finalidad de tener un panorama de lo que se hace en Chiapas con respecto al tratamiento de lixiviados.

#### Recopilación de información en fuentes secundarias

Revisión de tecnologías para el tratamiento de lixiviados reportados alrededor del mundo y su posible aplicación en el estado.

- Se realizó la revisión de las tecnologías para el tratamiento de lixiviados reportados alrededor del mundo, se tomaron en cuenta las publicaciones de los años 2005 al 2021. Las bases de datos consultadas fueron: Redalyc, Scielo, La Referencia, JSTOR y Elsevier. Los trabajos revisados fueron artículos de revisión tanto en inglés como en español, en donde se comparaban diversos tratamientos dados a los lixiviados.
- Se recopilaron los trabajos reportados en la literatura para el tratamiento de lixiviados en el territorio nacional y estatal. Estos trabajos fueron artículos, artículos de revisión, libros y tesis.
- Una vez obtenidos los documentos con respecto al tratamientos de lixiviados a nivel estatal, nacional y mundial, se elaboró una tabla en donde se mostraban los tipos de tratamiento más mencionados en la literatura.
- Después de realizar la actividad anterior, se llevó a cabo una nueva búsqueda de documentos, con respecto a los tratamientos identificados. En base a la metodología aplicada por Mesías [35], para seleccionar los documentos a utilizar se revisaron las referencias basados en los siguientes aspectos: teóricos fundamentales, aplicaciones del sistema de tratamiento, ventajas y desventajas, factores operacionales y los retos de los sistemas para su implementación.
  - a) A partir de los documentos recopilados, se realizó una matriz de decisión considerando los principales tipos de sistemas de tratamiento existentes en el estado de Chiapas, mismos que fueron comparados con aquellos sistemas que más se mencionan en la literatura y con potencial de ser aplicado teniendo en cuenta las condiciones de la entidad. Los aspectos a considerar en la evaluación de la matriz de decisión fueron los siguientes:
    - a) Eficiencias de remoción
    - b) Costo de la tecnología (inversión y mantenimiento)
    - c) Demanda de superficie
    - d) Producción de lodos
    - e) Características del líquido a tratar
    - f) Generación de residuos
    - g) Vida útil

- h) Complejidad de la construcción
- i) Flexibilidad de operación y necesidad de mano de obra calificada

Estos aspectos fueron tomados en cuenta en base a la metodología aplicada por Morgan et al. [36].

También se procedió a elaborar el mapa con la ubicación de los sistemas de tratamiento de lixiviados encontrados en el estado

- Una vez recopilados los datos proporcionados por la SEMAHN, se clasificaron los sistemas dependiendo de sus condiciones de uso y a su vez del tipo de tratamiento aplicado.

Según sus condiciones: normal, falta de mantenimiento y abandono.

Dependiendo el tipo de tratamiento: Lagunas de evaporación y humedales.

Estos a su vez se clasificaron dependiendo del tipo de relleno en los que se encuentran: A, B, C o D.

- Después de haber clasificado los tratamientos, estos fueron ubicados en un mapa utilizando el software QGis, para identificar los sistemas en el mapa se emplearon marcadores de distinto color los cuales indicaron que están en funcionamiento y a los cuales se les asignó una leyenda que indica el tipo de tratamiento implementado en ese lugar, después se ubicaron los sistemas que no se encuentran en funcionamiento, hasta plasmar la ubicación de todos los sistemas existentes y de las condiciones en las que se encuentran. Una vez establecidas las ubicaciones, se agregaron las capas básicas, la capa de mancha urbana y cuerpos de agua. Esto nos permitió conocer las ubicaciones de los sistemas y el ambiente en el que son implementados, es decir el relieve en donde se encuentran, densidad poblacional, clima de la región.

## V. RESULTADOS

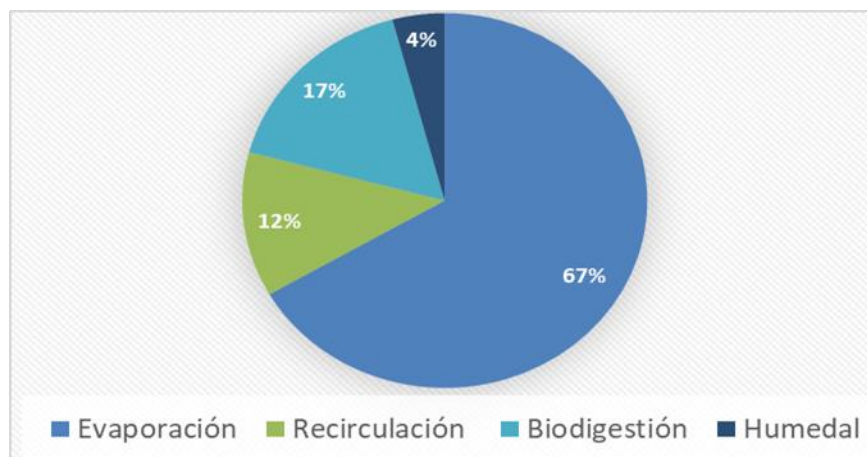
A partir de los datos proporcionados por la SEMAHN, se obtuvieron los municipios que cuentan con sistemas para el tratamiento de lixiviados. En total son 23 municipios y se reportan 4 tipos de tratamientos de lixiviados (Tabla 2). Cabe aclarar que se desconoce a lo que se refiere la secretaria con “Biodigestión”, sin embargo, esto es lo que reportan.

**Tabla 2.** Tipos de tratamiento aplicados a los lixiviados en Chiapas

Sistema	Municipios		
Evaporación	Tuxtla Gutiérrez	Huitiupán	
	Ocozocoautla de Espinosa	San Andrés Duraznal	Maravilla Tenejapa
	Ejido Benito Juárez		Tapachula
	Mpio. de la Concordia	Escuintla	
	Chiapilla	Marqués de Comillas	San Cristóbal de las Casas
	Nicolas Ruíz	Palenque	
	Venustiano Carranza	Chilón	Villa Flores
	Chanal	Comitán de Domínguez	
Recirculación	Tuxtla Gutiérrez		
	Ocozocoautla de Espinosa		
	Comitán de Domínguez		
Humedal	Villaflores		
Biodigestión	Motozintla	Simojovel	
	Amatán	Ostucán	

Fuente: SEMAHN, 2021 [37]

**Figura 7.** Porcentaje de los tipos de tratamiento aplicados a los lixiviados en Chiapas. Fuente: Adaptado de SEMAHN, 2021[38]



De la Fig.7, puede observarse que el tipo de sistema de tratamiento mayormente utilizado son las lagunas de evaporación con un 67% y otro 12% siguen siendo lagunas de evaporación, pero con recirculación. Estas cifras reflejan que alrededor del 79% de los sistemas de tratamiento para lixiviados en el estado, tienen como etapa medular a las lagunas de evaporación, lo que refleja la poca atención e importancia dada al tratamiento de una de las aguas residuales más complejas y contaminantes que el ser humano propicia. Esto se comenta porque el manejo de lixiviados con lagunas de evaporación e incluso recirculación, no representa una forma adecuada de tratamiento dadas las condiciones de alta precipitación que dominan en el territorio estatal, por lo que la sobreproducción de lixiviados llega a convertirse, en uno de los mayores retos en la operación de rellenos sanitarios.

A continuación, en la Tabla 3, se presentan las condiciones bajo las cuales operan los sistemas de manejo de lixiviados con los que cuentan los rellenos sanitarios en la entidad.

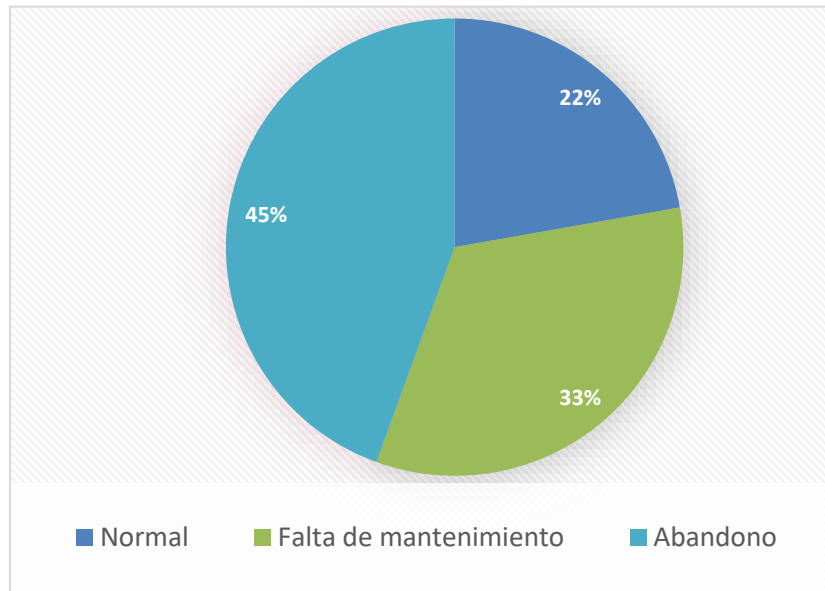
**Tabla 3.** Sistemas de manejo de lixiviados en Chiapas y condiciones existentes

Sistema de manejo de lixiviados	Cantidad	Condiciones	Cantidad
Laguna de lixiviados	14	Normal	3
		Falta de mantenimiento	5
		Abandono	6
Laguna techada	1	Normal	1
		Falta de mantenimiento	
		Abandono	
Laguna techada y laguna abierta	2	Normal	1
		Falta de mantenimiento	1
		Abandono	
Humedal	1	Normal	1
		Falta de mantenimiento	
		Abandono	

Fuente: Adaptado de SEMAHN, 2021 [37]

**Figura 8.** Condiciones de operación (en %) de los sistemas de captación de lixiviados existentes en Chiapas.

Fuente: Adaptado de SEMAHN, 2021 [37].



De la tabla 3 se observa que, de las cuatro variantes de manejo proporcionado a los lixiviados en el estado, la que predomina es la basada en lagunas de evaporación abierta y en solo 1 de los sitios se reporta la implementación de un tratamiento como tal, el basado en humedales artificiales, aunque desafortunadamente se reporta como una tecnología abandonada para el sitio propuesto. Llama la atención que de las 17 lagunas de evaporación reportadas (abiertas o cerradas), solo el 22% de ellas opera bajo condiciones normales, mientras que para el resto hace falta mantenimiento o en el peor de los escenarios, se encuentran abandonadas. Las lagunas son utilizadas para el tratamiento de lixiviados, donde se busca reducir su volumen a través de la evaporación del agua. Sin embargo, en Chiapas, dada las altas precipitaciones pluviales, hacen más cuestionable el manejo de los lixiviados solo a base de lagunas de evaporación, y más aún, cuando éstas no son techadas, y de acuerdo con los datos de la Tabla 2, solo dos de las 17 lagunas reportadas se encuentran cubiertas. En las siguientes figuras (Figura 9 a 17) se muestran algunas de las lagunas ubicadas en los rellenos sanitarios de los municipios de Chiapas, se pueden observar las condiciones de abandono y también lagunas en funcionamiento. En general, la poca atención a las lagunas ha propiciado que las láminas de los techos hayan sido robadas, también el mismo sistema de impermeabilización para algunos lugares, ha sido dañado, a través del robo directo de la geomembrana instalada, situación más crítica dada la posible liberación de los lixiviados.

**Figura 9.** Laguna de Chanal fuente: SEMAHN, 2021 [26]



**Figura 10.** Laguna de Chiapilla [26]



**Figura 11.** Laguna de Comitán [26]



**Figura 12.** Laguna de Escuintla [26]



**Figura 13.** Laguna de Benito Juárez la Concordia  
[26]



**Figura 14.** Laguna de Marqués de Comillas [26]



**Figura 15.** Laguna de Ocozocoautla [26]



**Figura 16.** Laguna de Palenque [26]



**Figura 17.** Laguna de Tuxtla Gutiérrez [26]



En cuanto a la capacidad de las lagunas de evaporación (Tabla 4), se tienen volúmenes muy variables, con valores desde los 210 m<sup>3</sup> para la laguna de Venustiano Carranza, hasta valores mayores del orden de los 11,111 y 14,700 m<sup>3</sup> para las lagunas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Llama la atención también, el alto valor en capacidad que se reporta para la laguna de Ocozocoautla de Espinosa (16,560 m<sup>3</sup>), esto considerando el tamaño de población del lugar, por ende, la cantidad de residuos que recibe.



**Tabla 4.** Dimensiones de los sistemas de tratamiento (lagunas) de los rellenos sanitarios de Chiapas.

Municipio	Base Mayor	Base Menor	Profundidad (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Chanal	10	7.58	3	227.5
Chiapilla	51.86	45.55	3.4	1654.95
Chilón	15	14.61	2.8	690.97
Comitán de Domínguez	40	40	2	3200
Escuintla	5	19.6	2	196   392*
La Concordia (Ejido Benito Juárez)	15	15	1.67	375.75
Maravilla Tenejapa	32.51	49.5	2	1402.17
Marqués de Comillas	50	15.44	2	1544
Nicolás Ruíz	4.06	1.2	1.2	3156
Ocozocoautla de Espinoza	72	46	5	16,560
Palenque	20	20	1.74	696.7
San Andrés Duraznal	271	53.82	4	651.5
Tuxtla Gutiérrez	70	70	3	14,700
	60.05	46.26	4	11,111
Venustiano Carranza	10.25	10.25	2	210
Villaflores	1416	1100	2.5	3145
Humedal				
Huitiupán	50	15.44	2	1544

\*Suma de las dos lagunas (tienen las mismas medidas) con las que cuenta Escuintla.

**Figura 18.** Humedal de Huitiupán [26]

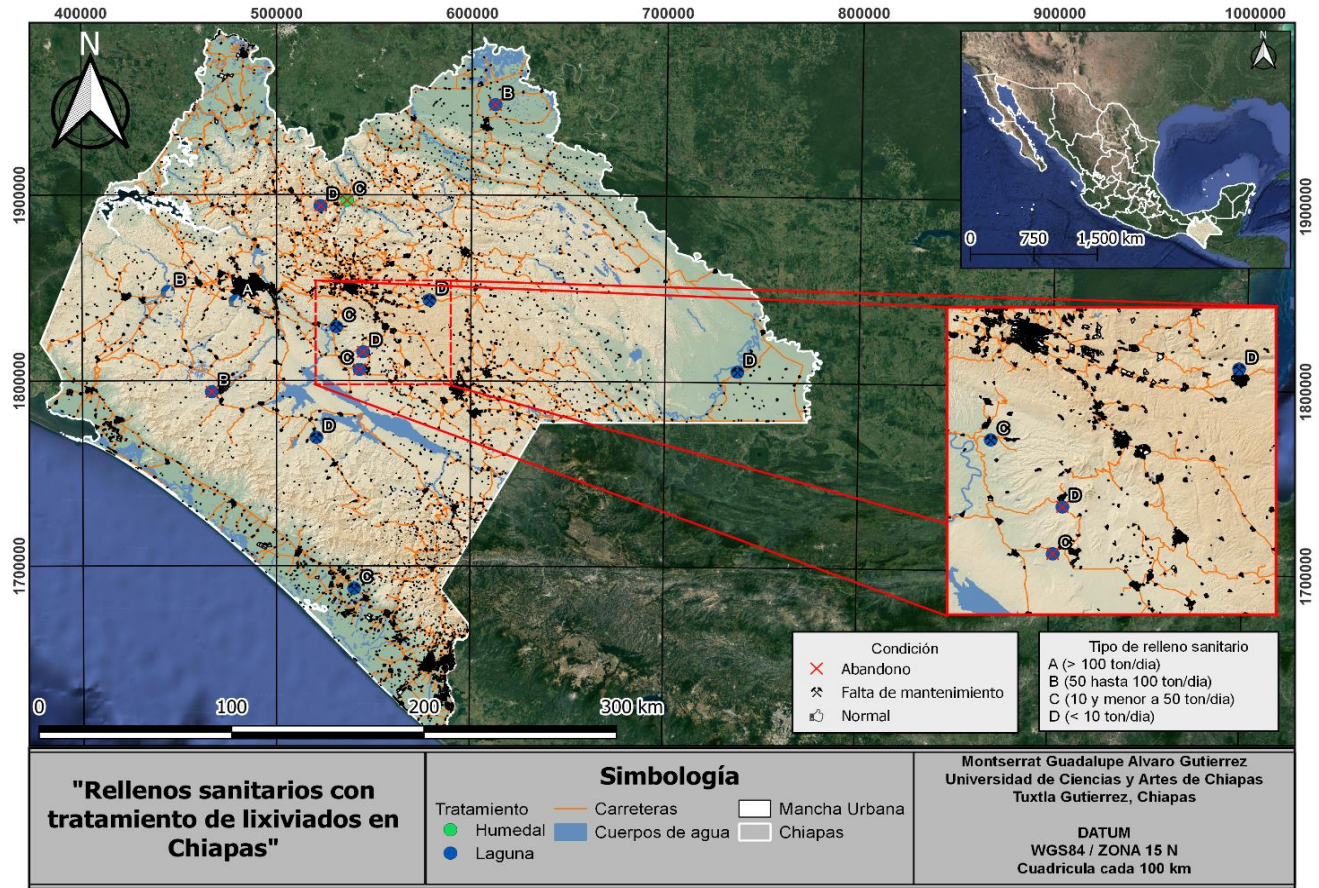


Por último, en el estado solo un relleno sanitario cuenta con un humedal (figura 18) y se encuentra fuera de uso. Es importante mencionar, que este tipo de tratamiento es usualmente empleado como etapa de depuración secundaria o terciaria dentro de un tren de tratamiento, por lo que los humedales son utilizados para mejorar la calidad del agua que ya ha sido previamente tratada. Razón por la cual, los lixiviados al contener altas concentraciones de carga orgánica, sales inorgánicas y metales pesados, el uso de un humedal como único tratamiento no es viable, además de que las altas concentraciones de hierro pueden incrustarse en el medio granular del humedal y reducir su eficiencia. En el caso de la alta concentración de amoníaco que generalmente caracteriza a los lixiviados, este compuesto puede llegar a afectar el desarrollo y crecimiento de los organismos existentes en el humedal [38]. Es por ello que el humedal no soporta la carga contaminante de los lixiviados y se inhibe la actividad de depuración de los humedales.

### V. 1. UBICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS EN CHIAPAS.

En las figuras 19 y 20 siguientes se pueden apreciar las zonas en donde se encuentran los rellenos sanitarios existentes en el año 2021 que cuentan con lagunas de evaporación para el tratamiento de lixiviados.

**Figura 19.** Mapa de la ubicación de los tratamientos de lixiviados en Chiapas. [Elaboración propia con información de SEMAHN 26]



En la figura 19, se pueden apreciar los trece puntos en azul que representan los RS con lagunas de evaporación, de los cuales solo dos se encuentran en condiciones normales, estos son los RS de Tuxtla Gutiérrez y Ocozocoautla. Cinco RS necesitan mantenimiento y el resto se encuentra en condiciones de abandono. Solamente existe un RS con un humedal para el tratamiento de lixiviados el cual se encuentra en abandono y pertenece al municipio de Huitiupán, esto de acuerdo a la información proporcionada por la SEMAHN [26].

Del mapa puede resaltarse que la mayoría de los rellenos son del tipo C y D, los RS se concentran en la zona centro-norte del estado, en donde también se concentran varios cuerpos de agua y se ubican

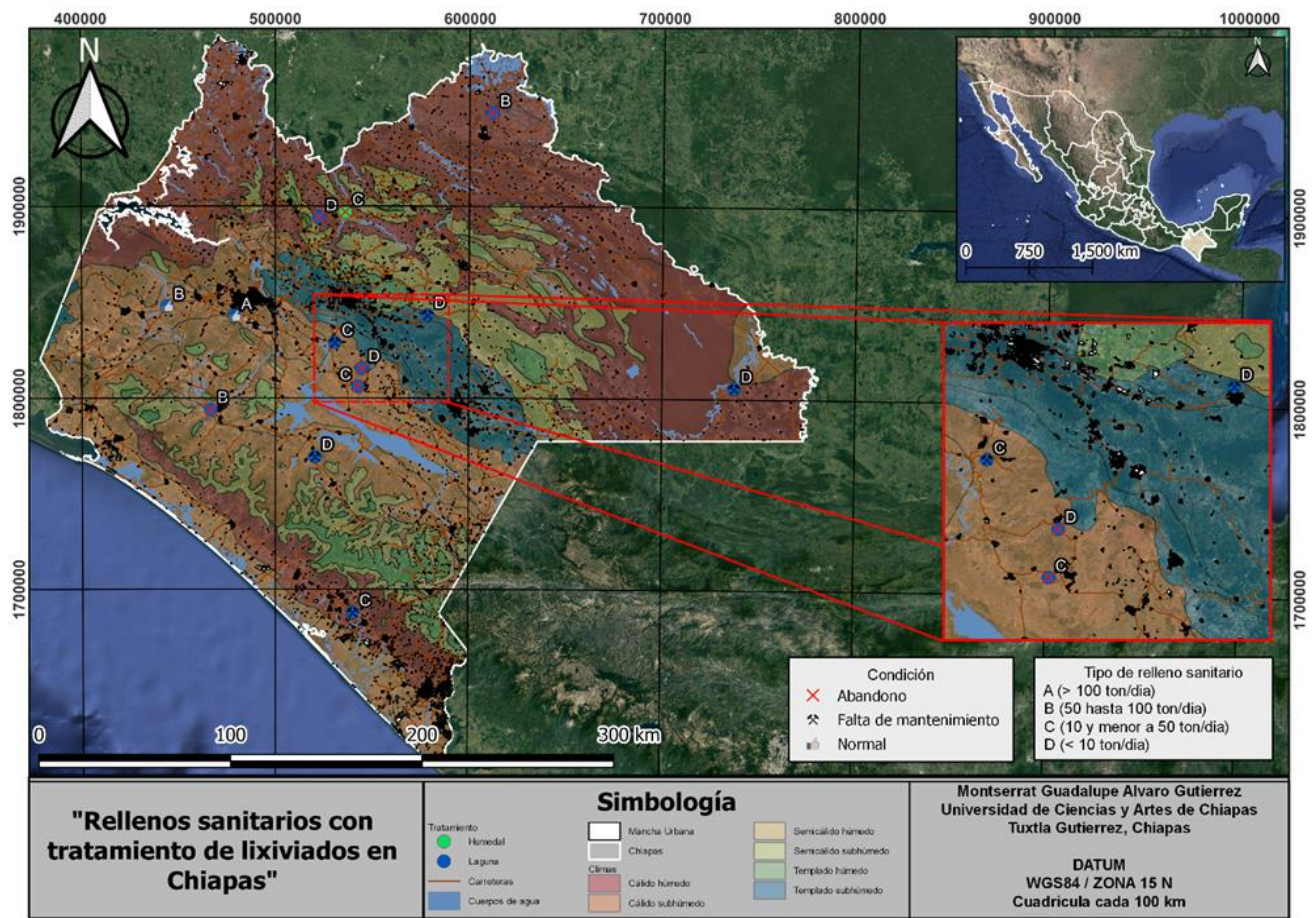
diversas zonas pobladas. Por otra parte, también se aprecian pocos RS con los que cuenta el estado al menos hasta el 2021.

Debido a la extensión del estado estos resultan ser insuficientes además que, de acuerdo con la mancha urbana representada con color negro en el mapa, hay zonas en las que se concentran varias poblaciones y no cuentan con algún RS cercano, por ende, no existe un tratamiento para los lixiviados que puedan producirse a partir de los RSU generados por estas poblaciones. Puede hacerse una comparación entre la figura 19 y la figura 3, en donde se presentan con puntos amarillos los sitios no controlados de los que se tiene conocimiento, los cuales se encuentran por todo el estado.

En la siguiente figura (Figura 20) se presenta las zonas climáticas en donde se encuentran los RS con tratamientos de lixiviados en el estado.

**Figura 20.** Mapa de la ubicación según la zona climática de los tratamientos de lixiviados en Chiapas.

[Elaboración propia con información de SEMAHN 26]



Según la figura 20, siete de los RS se encuentran en la zona cálido subhúmedo, estos representan más de la mitad de los RS hasta ahora reportados, 5 se encuentran en la zona cálida húmeda y solo un RS se encuentra en la zona templado subhúmedo. Por lo que la mayoría de las lagunas de evaporación se encuentran en condiciones cálidas, sin embargo, también hay una considerable existencia de humedad.

## **V.2. REVISIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS APLICADAS EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS.**

De la revisión hecha en la literatura, se tiene que existen diversos sistemas para tratar lixiviados, entre los más mencionados tenemos a los presentados en la tabla 5, y dentro de ellos, los más utilizados son los sistemas biológicos; como es el caso de los lodos activados, el reactor anaerobio de flujo ascendente, la recirculación y los sistemas con membrana. En un estudio realizado por Zafra [14], en donde se revisaron los tratamientos de lixiviados más reportados dentro de la literatura a nivel mundial, se encontró que los lodos activados son los más citados, seguido del tratamiento en conjunto con aguas residuales, la aireación, el reactor UASB, la evaporación forzada y la recirculación. Por tanto, al ser las tecnologías más reportadas, se decidió considerar a los lodos activados convencionales, también sus variantes como el reactor biológico secuencial (SBR por sus siglas en inglés) y el reactor UASB, para compararlos con las lagunas de evaporación, por ser esta última, la forma de manejo más utilizada en Chiapas.

**Tabla 5.** Tratamientos de lixiviados mencionados frecuentemente en la literatura.

Tipo de tratamientos	Tecnologías	Referencias
Tratamiento biológico aerobio	Lagunas aireadas	[8], [10], [5], [2], [39], [40], [41], [42]
	Lodos activados	[8], [10], [14], [2], [39], [40], [11], [42]
	Reactores biológicos secuenciales	[11], [39], [42]
	Filtro percolador	[10], [2], [43], [39]
	Biorreactor de lecho móvil	[10], [28]
	Contactor biológico rotatorio	[8], [11], [28]
Tratamiento biológico anaerobio	Reactores de biopelícula y de lodos granulados	[35]
	Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	[14], [24], [44], [5], [45], [2], [43], [28], [40], [42]
	Oxidación anaerobia del ion amonio	[11], [24], [28]
Sistemas de membranas	Biorreactores con Membrana	[44], [33], [2], [28], [11], [30]
	Ósmosis Inversa	[14], [32], [5], [33], [29], [30]
	Procesos de oxidación avanzada (POA)	[2], [31], [28]
	Ultrafiltración	[8], [14], [33]
	Nanofiltración	[8], [14]
Procesos fisicoquímicos	Precipitación química	[8], [33], [31], [28]
	Oxidación Química	[8], [33], [29]
	Adsorción con Carbono Activo	[45], [31]
	Proceso Fenton	[14], [46], [31]
	Floculación-Coagulación	[14], [34], [31], [28], [29]
Sistemas naturales	Humedales	[11], [14], [32], [5], [29]
	Lagunas	[11], [14], [32], [31]
Tratamiento en conjunto con aguas residuales municipales		[14], [34], [32], [33], [30]
Recirculación		[14], [24], [32], [33], [2], [29], [30]

Elaboración propia

### V.3. COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS IMPLEMENTADAS EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS

Entre los factores determinantes en la elección de un tratamiento para los lixiviados son su carga contaminante, su volumen de generación, características del terreno o el lugar de su producción, adquisición y factor económico que posea el país para la utilización de tecnologías en tratamientos y personal calificado [47].

A continuación, se describen cada uno de los factores que se evaluaron evaluados en la matriz en el contexto del estado.

#### Aplicabilidad del proceso

La aplicabilidad del proceso es una de las principales características que se tomaron en cuenta, y como fue mencionado anteriormente, las lagunas, aunque no sean propiamente una forma de tratamiento, pueden ser una forma de manejo eficiente bajo ciertas condiciones, sin embargo, la elevada pluviosidad que el

estado presenta, ha hecho que el control y manejo de los lixiviados a través de ellas, se complique para la época de lluvias.

#### Generación de residuos

Existen deficiencias en el tratamiento de lixiviados, lo que se busca es que los tratamientos implementados reduzcan la problemática en el estado, con el menor costo e incidencias. Por lo que este es un punto importante a considerar. Y de nueva cuenta, las altas precipitaciones pluviales que acompaña a la mayor parte de las regiones del estado de Chiapas, ponen de manifiesto la importancia de buscar e impulsar medidas preventivas que eviten al mínimo posible el contacto del agua de lluvia con el lixiviado.

#### Aceptación por parte de la comunidad

El tratamiento de lixiviados se realiza dentro de los propios RS, los cuales deben estar a cierta distancia de la población. Este punto puede tomarse con baja puntuación, ya que la comunidad no tendrá contacto directo con el tratamiento.

#### Requerimiento de área

Debido a que se busca tratamientos que demanden una menor área a la requerida por las lagunas de evaporación ya utilizadas, se privilegiará sistemas más compactos y que pueda ser viable de implementarlos en el mismo relleno sanitario.

#### Costo

Este aspecto considera el costo de inversión inicial y el de operación. Esto se tomará en el costo por metro cúbico a tratar de lixiviado.

#### Diseño y construcción

Para este rubro, se consideraron los criterios de diseño y la complejidad de construcción y de equipamiento.

#### Operación y requerimiento de personal

Es necesario tomar en cuenta este punto, ya que para el desempeño de los tratamientos es necesario conocer el nivel de tecnificación que pueda requerirse en el personal durante la operación de la planta, lo que va de la mano con la capacitación y disponibilidad de personal calificado o no calificado.

#### Entorno

Es un aspecto importante a considerar, pues los sistemas evaluados deben poder desempeñarse en el entorno del estado de Chiapas.

En la tabla 6 de la página siguiente, se presentan la comparación de las características y de las eficiencias de remoción y características de las tecnologías a evaluar en la matriz.



**Tabla 6.** Características de los sistemas UASB, lagunas y lodos activados para el tratamiento de lixiviados.

Características	Lagunas de evaporación	Lodos activados convencionales	UASB	SBR			
Demanda de superficie	Alta	Media	Mínima	Mínima			
Producción de lodos	Medio	Alto	Bajo	Medio			
Generación de olores	Medio	Medio	Medio	Bajo			
Características del líquido a tratar	Puede almacenar el lixiviado producido en los rellenos.	Afluyente con contenido alto de materia orgánica, compuestos orgánicos peligrosos y compuestos inorgánicos	Aguas con altas concentraciones de materia orgánica y con presencia de tóxicos	Afluyente con variaciones en la composición, concentración y caudal.			
Generación de residuos	Los lodos generados son ricos en sales y en materia orgánica	Este tratamiento tiene una generación excesiva de lodos, los cuales deben ser estabilizados.	Genera lodos estabilizados y biogás que puede utilizarse para la producción de energía.	Lodos, sólidos, material fino y flóculos.			
Flexibilidad de operación	Sencilla	Requiere personal capacitado	Sencilla	Requiere personal capacitado			
Complejidad de construcción	Sencilla	Media	Media	Media			
Requerimiento de energía (eléctrica)	No necesita	Alto consumo	Bajo consumo	Alto consumo			
Eficiencia de remoción de contaminantes	Propiamente, no hay un tratamiento, por lo que las remociones de parámetros básicos son nulas	DBO	90 %	DBO	80%	DBO	76%
		DQO	99%	DQO	90%	DQO	84.06%
		Metales	80-99%	SS	45%	SS	62.28%

\*Operación y mantenimiento

Elaboración propia con información de: [14], [42], [43], [48],[49], [50], [51], [52]

## V.4. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS A COMPARAR

### V.4.1. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR LAGUNAS DE EVAPORACIÓN

El uso de lagunas de evaporación ha sido ampliamente implementado en México. Debido a la sencillez tecnológica de sus equipos, su fácil manejo y bajo costo. Este proceso consiste en evaporar el agua contenida en el lixiviado por el calentamiento de las mismas. Esta tecnología permite que el lodo producido pueda ser dispuesto nuevamente en el relleno. Para la evaporación de lixiviados se puede utilizar el biogás producido en el propio relleno o la radiación solar como fuente de energía para el proceso de calentamiento del líquido. Los residuos generados son lodos ricos en sales y en materia orgánica, los cuales pueden disponerse en las celdas de los SDF, para que los lodos puedan propiciar la degradación de los desechos.

El tratamiento de lixiviados por evaporación, puede implementarse por medio de lagunas, invernaderos o por evaporación forzada. Para el caso de estanque o lagunas impermeabilizados, los parámetros principales para su diseño son la temperatura, la evaporación neta y el gasto. Para obtener buenos resultados en la evaporación se debe mantener una temperatura entre los 27 a 31°C, la cual influye en mantener constante la humedad en valores por debajo de 64%, ayudando a que se presente una mayor evaporación del lixiviado [40]. Esta es una tecnología muy simple, el lixiviado es expuesto a la radiación solar para la evaporación del mismo, sin embargo, también se expone a otros factores ambientales como la lluvia, lo que llega a incrementar el contenido de agua dentro de la laguna.

En el sistema de evaporación por invernaderos, estos tienen una estructura simple con una cubierta. En el invernadero se manipula el ambiente interno al controlar parámetros involucrados en el proceso de evaporación: humedad, temperatura, viento, altura del líquido y área del invernadero. Este sistema basa su eficiencia en concentrar la radiación solar en un espacio cerrado, para aumentar la temperatura ambiente en el interior y con ello la velocidad de evaporación [49]. Dentro del invernadero la radiación es retenida, por lo que la temperatura aumenta y por ende la evaporación es mayor. En ocasiones es necesario el empleo de equipos generadores de energía y se pueden emplear sistemas de ventilación natural o artificial que ayuden a regular la temperatura y controlar la humedad, con lo que se mantienen condiciones óptimas dentro del invernadero. Para la evaporación forzada incluye evaporadores de vacío con compresión mecánica de vapor y circulación forzada y también el uso del biogás generado en el propio relleno [49]. El biogás es quemado para generar energía, la cual se utiliza directamente para calentar el líquido y con ello lograr la evaporación.

#### V.4.2. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR LODOS ACTIVADOS CONVENCIONALES

Usualmente el tratamiento de lodos activados consiste de lo siguiente: un reactor biológico, un equipo para la aireación, un tanque sedimentador y un sistema de bombeo para la recirculación de lodos del sedimentador secundario hacia el tanque de aireación, además de una línea de purga de lodo [53].

El proceso de lodos activados requiere de una alta concentración de microorganismos, mayormente de bacterias, hongos y protozoos para la eliminación de la materia orgánica del agua residual [54]. Estos convierten la materia orgánica, entre otros contaminantes, en gases y tejidos celulares, para que esto pueda llevarse a cabo es necesario mantener los microorganismos en suspensión por medio de un mezclado y de aireación [55]

Entre las ventajas de este tipo de tratamiento, es que pueden ser utilizados para tratar aguas con contenido de amoníaco, carbón orgánico y nutrientes, es el método más eficiente en relación a costo-beneficio y puede ser aplicado a comunidades de distinto tamaño. Este tratamiento ha demostrado ser un método prometedor para el tratamiento de lixiviados, en él se puede mineralizar la materia orgánica, se oxidan las sustancias químicas y pueden reducirse los compuestos orgánicos peligrosos [52] [55][56].

En el caso de las desventajas, este tipo de tratamiento tiene una inadecuada sedimentabilidad y excesiva producción de lodos. Estos lodos deben ser estabilizados, ya que pueden provocar condiciones insalubres y mal olor. Necesita de una cantidad considerable de aireación por lo que los costos de energía son altos. Necesita de una supervisión regular y de personal capacitado. Tiene una alta sensibilidad a la inhibición bacteriana. Es sensible a las bajas temperaturas y a la oscilación de las cargas contaminantes en el caudal [57] [52][56].

El tratamiento biológico por lodos activados funciona en reactores y pueden ser procesos aerobios y anaerobios. Los lodos activados pueden remover eficientemente la materia orgánica biodegradable, convirtiéndola en dióxido de carbono y agua. Para el caso de lodos activados con procesos anaerobios, tienen un bajo consumo de energía, la desventaja es que el efluente tiene altas concentraciones de DQO y también tiende a retener concentraciones de materia biodegradable.

En el proceso aerobio se tiene altas eficiencias de remoción y alta biodegradación, la desventaja es el alto consumo de energía, lo que se traduce en mayor costo [13]. Un ejemplo del tratamiento aerobio son los lodos activados con aireación extendida, en donde la homogenización del sustrato, la aireación y sedimentación se realiza en un solo reactor. Cuando el proceso de aireación es prolongado, con el afán de atender la demanda química de oxígeno – DQO de los compuestos, es conocida como aireación extendida

[58]. Entre los reactores que utilizan el lodo activado, están los reactores UASB, el Biorreactor de membrana anaerobio (anaerobic MBR por sus siglas en inglés), el reactor de lecho de lodo granular expandido (EGSB), el cual es una variante del reactor UASB y por último el reactor biológico secuencial (SBR).

Componentes y control del proceso:

El tanque de aireación es el principal componente de los lodos activados, en él se llevan a cabo los procesos de retención de flujo, el tratamiento y el proceso de aireación y mezclado.

Para operar de manera eficiente, es importante que los lodos alcancen una adecuada sedimentación de licor mezclado (mezcla de agua residual y lodos activados). En el caso de los lodos activados convencionales, el flujo de los lodos activados recirculados (LAR) es de 20 y 40% del flujo que entra a la planta [59]. El control de flujo de recirculación mediante un caudal constante se logra por la sedimentabilidad del lodo y el monitoreo de la profundidad de la cama de lodo.

Existen diversos factores que afectan el crecimiento de las bacterias entre ellos están la temperatura, el pH, los nutrientes (N y P), el oxígeno disuelto y la presencia de sustancias tóxicas.

La temperatura óptima para las bacterias aerobias es de 15-25°C, el rango del pH adecuado se encuentra entre 6-8, en el caso que se necesiten adicionar nutrientes, como el nitrógeno, por ejemplo, se puede utilizar la urea o sales de amonio; para la adición de fósforo, se utiliza el ácido fosfórico o fosfato de sodio. Otro parámetro importante de monitorear, es el oxígeno disuelto, cuyo rango ideal se encuentra entre los 0.5-1 mg/l de oxígeno disuelto. Y por último las sustancias tóxicas inhiben el crecimiento de las bacterias [60].

Droppelamann et al [61], estudiaron el comportamiento de un sistema de lodos activados en la remoción de DBO y nitrógeno amoniacal, de un lixiviado previamente tratado en una laguna anaeróbica. Utilizaron el lixiviado del RS Loma Los Colorados en Chile con 10 años de antigüedad. Utilizaron una unidad PIGNAT, modelo TAE/1000 para el tratamiento del lixiviado. El cual fue operado con tres factores de cargas distintas y la DBO se determinó semanalmente. De los resultados que obtuvieron están las eficiencias alcanzadas de 98% en DBO y 99% en nitrógeno amoniacal.

### V.4.3. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR UASB

El funcionamiento del reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) también conocido como UASB por sus siglas en inglés, consiste en que el agua a tratar ingresa por medio de unas tuberías desde la parte inferior del reactor, para ser distribuida e inyectada al sistema desde diferentes puntos de alimentación, donde el agua asciende hacia el manto de lodos (microorganismos anaerobios), que llevan a cabo la degradación de compuestos complejos mediante una serie de etapas (hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis) [35], de igual manera cuenta con un sistema de separación gas-sólido-líquido que impide la salida de sólidos suspendidos en el efluente y ayuda a la evacuación del gas [36]. El reactor está compuesto por un lecho de lodos y manto de lodos (materia orgánica dispersa). El líquido que ingresa por la parte inferior del reactor, entra primeramente en contacto con el lecho de lodos altamente concentrados en sólidos, mientras el agua asciende, el lodo es movido, debido a esto se forma el manto de lodos. El agua asciende hasta la parte de separación de gas-sólido-líquido. El biorreactor se encuentra dividido en dos zonas: zona de digestión y zona de sedimentación. El biogás, el lodo y el líquido tratado ascienden a la parte superior del reactor, en donde entran en contacto con deflectores que permiten la separación del biogás y la sedimentación del lodo [35]. Una vez separado el biogás, este es recogido en la campana de recolección y el líquido tratado sale por la parte superior.

En el UASB se llevan a cabo los procesos de degradación de materia orgánica por medio de bacterias, las cuales forman dentro del reactor un lodo biológicamente activo. Existen diversos factores que pueden inhibir las reacciones dentro del reactor, entre estos factores se encuentra el pH, ya que altos o bajos valores pueden provocar la muerte de bacterias metanogénicas. En general, el rango de pH recomendado se encuentre entre los 6.8 y 7.4. La temperatura es otro factor importante, y en los procesos anaerobios la temperatura óptima es de 37°C. Otro factor más son los sólidos volátiles por día; y su valor recomendado no debe exceder el 5 por ciento de los sólidos totales por día. En el caso de los ácidos grasos volátiles (AGV), puede provocar que el pH se reduzca, una concentración aceptable es de 50 a 300 mg/L [41].

Para el mantenimiento en este tipo de reactores, la CONAGUA recomienda que un operador se asegure que las tuberías no estén obstruidas. La superficie del UASB, debe ser lavada por lo menos una vez por semana utilizando la propia agua tratada a presión. Si el efluente del reactor contiene una cantidad de lodos, es necesario hacer la purga del reactor, esto se recomienda hacerlo con una bomba especializada para lodos.

Entre las ventajas de este reactor tenemos los bajos costos de operación e inversión, producción mínima de lodos, requerimientos nutricionales mínimos, los lodos pueden mantenerse sin alimentación por un

tiempo prolongado, producen biogás (metano) aprovechable como fuente de energía, debido a que el sistema no requiere una agitación mecánica, el consumo energético es mínimo y por último el reactor es compacto por lo que no necesita un área superficial extensa [39], [42].

Las desventajas de este tipo de reactor están: el largo periodo de arranque, debido a que se necesita mantener las condiciones idóneas para el crecimiento de la biomasa por lo que es necesario adicionar los nutrientes necesarios y la digestión anaerobia necesita un tratamiento posterior para la remoción de la DBO5 remanente, el amonio y los compuestos de mal olor [39], [42].

Desempeño del UASB para el tratamiento de lixiviados a escala laboratorio y a escala real.

Torres Lozada[62] operaron un reactor durante 6 meses con un tiempo de retención de 24 horas. El inóculo provenía del lodo de las lagunas de almacenamiento de lixiviados y con lodo de un reactor anaerobio de una planta de tratamiento de aguas residuales. Como sustrato utilizaron el lixiviado que provenía del drenaje del RS el cual tenía 3 años de existencia. Este tenía características muy variables, una concentración de DQO de entre los 3,576- 59,350 mg/l, Nitrógeno amoniacal de 1.092 mg/l y fósforo total de 13.5 mg/l, entre otras características. El UASB utilizado era de acrílico del tipo circular, con 6 cm de diámetro, 177 cm de altura y con una capacidad de 5 litros.

Las variables de control del UASB, fueron: pH, temperatura, AGV, Alcalinidad Total y Bicarbonática, DQO, IB, SST y SSV. Durante los primeros días de operación, el reactor presentó bajas remociones de DQO, por lo que un ajuste de pH fue requerido, dado que tenía valores altos. El pH llegó hasta los 5.75 una vez que se le adicionó una solución de HCL al 25 % y con la adición de  $K_2HPO_3 \cdot 3H_2O$ , el reactor logró remociones mayores al 90% de DQO.

En el relleno la “Esmeralda” en Colombia, con área de 54 ha y una vida útil de 1995-2016, recibía alrededor de 380 Ton/día. El lixiviado “nuevo” dentro del relleno presentaba una DQO de 39,150 mg/L, una DBO5 de 30,500, Nitrógeno amoniacal de 1920 mg/l, fósforo de 122 mg/l y un pH de 6.7. Para el lixiviado “viejo” los valores en mg/l, en el mismo orden anterior eran de 228, 24, 3.6, 2.8 y un pH de 7.6. Morrillo et al (2005), realizaron un estudio en donde evaluaban el desempeño del reactor. Este contaba con dos cámaras separadas con 3 m de ancho, 10 m de largo, 3 m de profundidad y una capacidad de 180 m<sup>3</sup>. El monitoreo se basó en una caracterización físico-química de lixiviado y del lodo producido. El estudio se llevó a cabo durante 15 semanas, en donde se utilizó el reactor 2 como blanco y en el reactor 1 se hicieron cambios en su alimentación. Las variables medidas fueron el Fósforo, Nitrógeno total, DQO,

DBO, sólidos y perfil de lodos, caudal del reactor y la sedimentabilidad. Durante la semana 11 cuando se forzó la carga orgánica, obtuvieron mayores remociones entre ellas 92 % de DBO5, 91 % de DQO, 96% de nitrógeno. Sin embargo, al aumentar la carga, la remoción de fósforo disminuyó hasta los -115%. Con los resultados obtenidos los autores pudieron corroborar que los UASB pueden funcionar con cargas orgánicas elevadas y que los reactores bien monitoreados no presentan malos olores [48].

#### **V.4.4. TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR SBR**

Entre las variantes más comunes de los lodos activados están el flujo pistón y los procesos de mezcla completa. Pero entre los sistemas que utilizan reactores con lodos activados, los reactores secuenciales discontinuos (SBR) son los más utilizados para el tratamiento de lixiviados por su estructura simple y su gran capacidad [13]. Este reactor trabaja por cargas, son eficientes en la remoción de carbonos orgánicos y nutrientes (fósforo y nitrógeno). Su operación consiste en una fase de llenado, reacción, sedimentación, decantación y purga[23]. La purga de lodos del reactor es un proceso importante, generalmente se realiza en la fase de reacción en donde se descargan sólidos, material fino y flóculos. Este sistema no necesita de una recirculación de lodos activados [63]. Este es el único sistema que lleva a cabo en un solo tanque los procesos de aireación, reacción y clarificación.

Durante la primera fase, de llenado, se introduce el agua residual a tratar de manera estática, también puede introducirse el agua durante la fase de reacción. Esto se conoce como llenado dinámico.

En la segunda fase, de reacción, el agua es mezclada de forma mecánica para eliminar las espumas superficiales que puedan formarse y se inyecta aire al sistema. En esta fase se lleva a cabo la degradación biológica.

En el proceso de decantación, el agua se mantiene estática, en esta condición se logra el reposo y los lodos se sedimentan. Por último, la purga o vaciado se realiza mediante un sistema de eliminación de sobrenadante superficial.

La fase de lodos activados se lleva a cabo durante la fase de llenado y vaciado. La diferencia entre un tratamiento con lodos activados y el SBR, es que en ambos se llevan a cabo los procesos de aireación y sedimentación; en el caso del sistema convencional, estos se realizan de manera simultánea en distintos tanques, mientras que, en el SBR, estos se realizan en un solo tanque de manera secuencial.

Las ventajas de este tipo de reactores son: la eficiencia en la sedimentación secundaria la cual se realiza en condiciones estáticas, la flexibilidad entre las variaciones del caudal y de su carga contaminante, su

funcionamiento es automático, no son necesarios los sedimentadores secundarios por lo que requiere poco espacio para su instalación.

En el caso de las desventajas se tiene que es necesario que el personal esté estrictamente capacitado para el control del sistema, necesita una inversión más alta para el sistema de aireación y necesita un mantenimiento periódico [64].

BAKAR 2012[65] , realizaron un trabajo a nivel laboratorio en donde estudiaron el desempeño de un SBR en el tratamiento del lixiviado producido en el RS de Pasir Gudang en Malasia, hasta el año del estudio el RS ya tenía 10 años desde su construcción. El reactor fue operado con tres fases consecutivas, anaerobia, anóxica y aerobia. Entre las eficiencias de remoción obtenidas, están para la DQO 90%, para los sólidos suspendidos una remoción de 80% y 80% de remoción de la turbiedad.

## **V.5 Costos de inversión y mantenimiento**

Con respecto a los costos de implementación y operación del UASB, estos tienen un menor costo de operación e instalación, en realidad son pocos los trabajos que reportan los costos en la operación de esta tecnología en el tratamiento de lixiviados, por lo que también se tomaron en cuenta lo estudiado para el tratamiento de aguas residuales distintas al lixiviado. En el trabajo reportado por ARCOS [66], comparó los costos de inversión, operación y mantenimiento de un UASB y de un SBR, para el tratamiento de agua residual de una industria curtiembre en un mes de operación con un caudal de  $3.9 \text{ m}^3/\text{h}$ , el costo total para el RAFA fue de \$10,130.6 y para el SBR fue de \$14,484.5. Los costos de inversión de una planta dependen de su tamaño, las características del residual a tratar, entre otros aspectos. Según Fernández y Seghezzi [67] tienen un costo estimado de 100 USD por habitante en plantas de tratamiento mediano y para el mantenimiento se estima 1 USD por habitante.

En base a la información recopilada se prosiguió al llenado de las cuatro matrices de decisión basadas en el formato elaborado por Morgan et al. [36], mismas que se encuentran en el Anexo 1 del presente trabajo. Divididas en A, B, C y D, cada una representa uno de los tratamientos evaluados. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Lagunas de evaporación: **47.6 puntos.**
- Lodos activados convencionales **44.9 puntos.**



- Reactor anaerobio de flujo ascendente: **52.5 puntos.**
- Reactor biológico secuencial: **51.7 puntos.**

De acuerdo con los resultados obtenidos en la matriz, el reactor UASB tiene mayor puntuación en comparación a los otros sistemas estudiados, el resultado se atribuye a que el reactor sí presenta un tratamiento a los lixiviados en comparación con las lagunas de evaporación, las cuales solo reducen el volumen de los lixiviados mediante la evaporación y durante este proceso, no solo se evapora la parte agua de los lixiviados sino que también se evaporan contaminantes como compuestos orgánicos volátiles[68], los cuales son emitidos a la atmósfera y son nocivos para la salud de las personas que trabajan en los RS. Las lagunas resultan insuficientes para el tratamiento de lixiviados, a pesar de tener un buen desempeño en la reducción de los lixiviados, bajos costos, su mantenimiento y operación es sencillo. Otro aspecto favorable del reactor UASB, es que puede hacer frente a las lluvias, las cuales representan un verdadero problema en la operación de las lagunas de evaporación. También los reactores UASB tienen un precio bajo en comparación a otros reactores biológicos. En el caso de los SBR, estos presentan buenas eficiencias de remoción de los contaminantes de los lixiviados y si se comparan con los lodos activados convencionales, estos demandan menor superficie, por lo que son más económicos, sin embargo, al no ser utilizados en el tratamiento de lixiviados en México, su reproducción aún está en un proceso de experimentación, al ser necesario conocer su desempeño y las posibles limitaciones que puedan tener en el tratamiento de lixiviados en el estado.

## **VI. CONCLUSIONES**

En el estado de Chiapas, el tratamiento de lixiviados producidos en los rellenos sanitarios es deficiente, lo cual queda reflejado ante la falta de mantenimiento a la escasa infraestructura existente y a las condiciones de abandono que presentan los sistemas de tratamiento de la entidad.

Las lagunas de evaporación son los sistemas de tratamiento de lixiviados mayormente utilizados debido a la simplicidad en su operación y bajos costos. Sin embargo, estas llegan a ser insuficientes dada la elevada pluviometría existente en el estado y que se traduce en posibles saturaciones en las capacidades de las lagunas existentes con probables rebosamientos para los días más críticos de lluvia.

En general, dado a que los lixiviados tienen una composición variada, no existe un tratamiento que pueda emplearse de manera universal, sin embargo, de acuerdo con la revisión de la literatura reportada alrededor del mundo, los tratamientos biológicos son los más mencionados. Entre ellos se encuentran los lodos activados, los reactores anaerobios del tipo UASB y los biorreactores con membrana. Para incrementar y alcanzar niveles de eficiencia suficientes con estos tratamientos, será necesario acompañarlo de etapas complementarias o de la combinación de uno o más tecnológicas dentro del tren de tratamiento que se proyecte.

Finalmente, de las tres tecnologías evaluadas (lodos activados, UASB y SBR) y comparadas con las lagunas de evaporación a través de las matrices de decisión elaboradas, el reactor UASB fue el tratamiento con mayor puntuación, por lo que puede representar una alternativa tecnológica atractiva de impulsar en el tratamiento de lixiviados en el estado de Chiapas.

## VII. ANEXOS

Anexo A. Matriz de lagunas de evaporación.

			Lagunas de evaporación		
	A	B	C	D	E
#	%	Proceso evaluado	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 2= aceptable 3= adecuado 4= muy bueno 5= excelente	C/5 (excepto en renglones 6.3, 7.3, 8.4 y 9.3)	D*A
1	10	Aplicabilidad del proceso	5	1	10
2	2	Generación de residuos	4	0.8	1.6
3	0	Aceptación por parte de la comunidad	5	1	0
4	3	Vida útil	5	1	3
5	10	Requerimiento de Área	1	0.2	2
6	30	<b>Costo</b>			
6.1		Inversión y operación	4		
6.3		Sumar las casillas 6.1 y 6.2 y dividir el total entre 10. Anotar el resultado en la casilla 6.3 D		0.4	12
7	10	<b>Diseño y construcción</b>			
7.1		Criterios de diseño	4		
7.2		Complejidad en la construcción y equipamiento	4		
7.3		Sumar las casillas 7.1 y 7.2 y dividir el total entre 20. Anotar el resultado en la casilla 7.3D.		0.4	4
8	20	<b>Operación y mantenimiento</b>			
8.1		Flexibilidad de operación	5		
8.2		Complejidad de operación del proceso	5		
8.3		Requerimiento de personal	5		
8.4		Sumar las casillas 8.1, 8.2 y 8.3 y dividir el total entre 25. Anotar el resultado en la casilla 8.4D.		0.6	12
9	15	<b>Entorno</b>			
9.1		Influencia de la temperatura	3		
9.2		Influencia de la precipitación	1		
9.3		Generación de gases de efecto invernadero (huella de carbono) y los otros gases tóxicos	3		
9.4		Sumar las casillas 9.1 y 9.2 y dividir el total entre 20. Anotar el resultado en la casilla 9.3D.		0.2	3
10	100	<b>Sumar los valores de la columna E y anotar el resultado en la casilla 10E.</b>			47.6

Anexo B. Matriz de UASB

			UASB		
	A	B	C	D	E
#	%	Proceso evaluado	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 2= aceptable 3= adecuado 4= muy bueno 5= excelente	C/5 (excepto en renglones 6.3, 7.3, 8.4 y 9.3)	D*A
1	10	Aplicabilidad del proceso	5	1	10
2	2	Generación de residuos	3	0.6	1.2
3	0	Aceptación por parte de la comunidad	5	1	0
4	3	Vida útil	5	1	3
5	10	Requerimiento de Área	5	1	10
6	30	<b>Costo</b>			
6.1		Inversión y operación	4		
6.3		Sumar las casillas 6.1 y 6.2 y dividir el total entre 10. Anotar el resultado en la casilla 6.3 D		0.4	12
7	10	<b>Diseño y construcción</b>			
7.1		Criterios de diseño	4		
7.2		Complejidad en la construcción y equipamiento	3		
7.3		Sumar las casillas 7.1 y 7.2 y dividir el total entre 20. Anotar el resultado en la casilla 7.3D.		0.35	3.5
8	20	<b>Operación y mantenimiento</b>			
8.1		Flexibilidad de operación	4		
8.2		Complejidad de operación del proceso	3		
8.3		Requerimiento de personal	4		
8.4		Sumar las casillas 8.1, 8.2 y 8.3 y dividir el total entre 25. Anotar el resultado en la casilla 8.4D.		0.44	8.8
9	15	<b>Entorno</b>			
9.1		Influencia de la temperatura	4		
9.2		Influencia de la precipitación	5		
9.3		Generación de gases de efecto invernadero (huella de carbono) y los otros gases tóxicos	4		
9.4		Sumar las casillas 9.1 y 9.2 y dividir el total entre 20. Anotar el resultado en la casilla 9.3D.		0.26666667	4
10	100	<b>Sumar los valores de la columna E y anotar el resultado en la casilla 10E.</b>			52.5

Anexo C. Matriz de lodos convencionales

			LODOS CONVENCIONALES		
	A	B	C	D	E
#	%	Proceso evaluado	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 2= aceptable 3= adecuado 4= muy bueno 5= excelente	C/5 (excepto en renglones 6.3, 7.3, 8.4 y 9.3)	D*A
1	10	Aplicabilidad del proceso	5	1	10
2	2	Generación de residuos	3	0.6	1.2
3	0	Aceptación por parte de la comunidad	5	1	0
4	3	Vida útil	5	1	3
5	10	Requerimiento de Área	4	0.8	8
6	30	<b>Costo</b>			
6.1		Inversión y operación	3		
6.3		Sumar las casillas 6.1 y 6.2 y dividir el total entre 10. Anotar el resultado en la casilla 6.3 D		0.3	9
7	10	<b>Diseño y construcción</b>			
7.1		Criterios de diseño	2		
7.2		Complejidad en la construcción y equipamiento	3		
7.3		Sumar las casillas 7.1 y 7.2 y dividir el total entre 20. Anotar el resultado en la casilla 7.3D.		0.25	2.5
8	20	<b>Operación y mantenimiento</b>			
8.1		Flexibilidad de operación	3		
8.2		Complejidad de operación del proceso	3		
8.3		Requerimiento de personal	3		
8.4		Sumar las casillas 8.1, 8.2 y 8.3 y dividir el total entre 25. Anotar el resultado en la casilla 8.4D.		0.36	7.2
9	15	<b>Entorno</b>			
9.1		Influencia de la temperatura	4		
9.2		Influencia de la precipitación	4		
9.3		Generación de gases de efecto invernadero (huella de carbono) y los otros gases tóxicos	4		
9.4		Sumar las casillas 9.1 y 9.2 y dividir el total entre 20. Anotar el resultado en la casilla 9.3D.		0.26666667	4
10	100	<b>Sumar los valores de la columna E y anotar el resultado en la casilla 10E.</b>			44.9

Anexo D. Matriz de SBR

			SBR		
	A	B	C	D	E
#	%	Proceso evaluado	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 2= aceptable 3= adecuado 4= muy bueno 5= excelente	C/5 (excepto en renglones 6.3, 7.3, 8.4 y 9.3)	D*A
1	10	Aplicabilidad del proceso	5	1	10
2	2	Generación de residuos	3	0.6	1.2
3	0	Aceptación por parte de la comunidad	5	1	0
4	3	Vida útil	5	1	3
5	10	Requerimiento de Área	5	1	10
6	30	<b>Costo</b>			
6.1		Inversión y operación	4		
6.3		Sumar las casillas 6.1 y 6.2 y dividir el total entre 10. Anotar el resultado en la casilla 6.3 D		0.4	12
7	10	<b>Diseño y construcción</b>			
7.1		Criterios de diseño	3		
7.2		Complejidad en la construcción y equipamiento	4		
7.3		Sumar las casillas 7.1 y 7.2 y dividir el total entre 20. Anotar el resultado en la casilla 7.3D.		0.35	3.5
8	20	<b>Operación y mantenimiento</b>			
8.1		Flexibilidad de operación	4		
8.2		Complejidad de operación del proceso	3		
8.3		Requerimiento de personal	3		
8.4		Sumar las casillas 8.1, 8.2 y 8.3 y dividir el total entre 25. Anotar el resultado en la casilla 8.4D.		0.4	8
9	15	<b>Entorno</b>			
9.1		Influencia de la temperatura	4		
9.2		Influencia de la precipitación	3		
9.3		Generación de gases de efecto invernadero (huella de carbono) y los otros gases tóxicos	4		
9.4		Sumar las casillas 9.1 y 9.2 y dividir el total entre 20. Anotar el resultado en la casilla 9.3D.		0.26666667	4
10	100	<b>Sumar los valores de la columna E y anotar el resultado en la casilla 10E.</b>			51.7

## VIII. REFERENCIAS

- [1] A. Pellón Arrechea, M. López Torres, and M. del C. Espinosa Lloréns, “Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos,” *Ing. HIDRÁULICA Y Ambient.*, vol. 36, pp. 3–16, 2015, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/317518105\\_Propuesta\\_para\\_tratamiento\\_de\\_lixiviados\\_en\\_un\\_vertedero\\_de\\_residuos\\_solidos\\_urbanos](https://www.researchgate.net/publication/317518105_Propuesta_para_tratamiento_de_lixiviados_en_un_vertedero_de_residuos_solidos_urbanos)
- [2] A. . Martínez-Lopez *et al.*, “Alternativas actuales del manejo de lixiviados,” *Av. en Química*, vol. 9, pp. 37–47, 2014, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93330767005>
- [3] H. A. Nájera Aguilar, J. M. Gómez Ramos, C. García Lara, R. Gutiérrez Hdez, and M. N. Rojas Valencia, “Manejo de biogas y lixiviados en rellenos sanitarios del centro de México, un panorama general,” *LACANDONIA*, vol. 4, pp. 117–131, 2010, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/320699326\\_Manejo\\_de\\_biogas\\_y\\_lixiviados\\_en\\_rellenos\\_sanitarios\\_del\\_centro\\_de\\_Mexico\\_un\\_panorama\\_general%0A%0A](https://www.researchgate.net/publication/320699326_Manejo_de_biogas_y_lixiviados_en_rellenos_sanitarios_del_centro_de_Mexico_un_panorama_general%0A%0A)
- [4] R. I. Méndez Novelo, E. Sandoval Cachón, M. R. Riancho Sauri, and E. R. Borges Castillo, “Influencia del material de cubierta en la composición de los lixiviados de un relleno sanitario,” *Ingeniería*, vol. 6, no. 2, pp. 7–12, 2002.
- [5] P. A. Arango Romero, “Evaluación de alternativas para el tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario Antanas del Municipio de San Juan de Pasto en Colombia,” “Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. <http://digital.bl.fcen.uba.ar>,” 2013.
- [6] P. Torres Lozada, L. E. Barba Ho, C. Ojeda, J. Martínez, and Y. Castaño, “Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad,” *Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Científica*, vol. 17, no. 1, pp. 245–256, 2014, doi: 10.31910/rudca.v17.n1.2014.960.
- [7] G. Bernache-Pérez, “RIESGO DE CONTAMINACIÓN POR DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS. UN ESTUDIO DE LA REGIÓN CENTRO OCCIDENTE DE MÉXICO,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 28, no. 1, pp. 97–105, 2012, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37025166015>
- [8] A. Smailagić, S. Simić, D. Golubovic, G. Orasanin, M. Davor, and K. Batinić, “REVIEW OF TECHNIQUES FOR LANDFILL LEACHATE TREATMENT,” *Ann. Fac. Eng. Hunedoara*, vol. 18, pp. 131–135, 2020.
- [9] A. Rajasekar, S. Raju, E. Medina-Roldan, J. Bridge, K. . Moy Charles, and S. Wilkinson, “Next-

- generation sequencing showing potential leachate influence on bacterial communities around a landfill in China,” *Chem. Eng. Technol.*, vol. 64, pp. 537–549, 2018, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1139/cjm-2017-0543>
- [10] D. Bove, S. Merello, D. Frumento, S. Al Arni, B. Aliakbarian, and A. Converti, “A Critical Review of Biological Processes and Technologies for Landfill Leachate Treatment,” *Chem. Eng. Technol.*, vol. 38, no. 12, pp. 2115–2126, 2015, doi: 10.1002/ceat.201500257.
- [11] L. Mercedes Sandri, “DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES LIXIVIADOS PROVENIENTES DEL RELLENO SANITARIO DEL PARTIDO DE NECOCHEA, PROVINCIA DE BUENOS AIRE,” Universidad Nacional de San Martín., 2021. [Online]. Available: <https://ri.unsam.edu.ar/handle/123456789/1506>
- [12] Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento, *Volumen 26 Diseño de Aguas Residuales Municipales : Lagunas de Estabilización*. 2014.
- [13] K. Wang, L. Li, F. Tan, and D. Wu, “Treatment of landfill leachate using activated sludge technology: A review,” *Archaea*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/1039453.
- [14] C. Zafra and D. Romero, “Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos \* Technology Trends of Leachate Treatment in Ibero-American Landfills Tendências tecnológicas de depuração de lixiviados em aterros sanitários ibero-americanos,” *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 18, no. 35, pp. 125–147, 2019.
- [15] I. Dahlan, “Leachate Treatment: Case Studies in Selected European and Asian Countries,” in *Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, I. R. M. A. (IRMA), Ed. 2019, pp. 1037–1054. doi: 10.4018/978-1-7998-1210-4.
- [16] SEMARNAT, *Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos sólidos*, Secretaría. 2020.
- [17] SEMARNAT, “Sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos según sistema de captación y extracción de lixiviados del sitio 2018,” 2021.
- [18] Ruiz L, Gavilán A, Mendoza A, Ramírez T, and Araiza J, “Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos,” pp. 1–314, 2022, [Online]. Available: <https://www.gob.mx/inecc>
- [19] Veolia.gob.mx, “Relleno Sanitario Tuxtla Gutiérrez.” <https://www.veolia.com.mx/tuxtla/servicios/relleno-sanitario>
- [20] H. Nájera Aguilar, H. Castañón G., A. Figueroa G., and M. N. Rojas Valencia, “Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez , Chiapas,” *Conf. 3er Encuentro Nac. Expert. en Residuos Sólidos*, no. March, 2010.



- [21] H. A. Nájera, R. A. Vázquez, and M. N. Rojas, “Aplicación De Un Sistema Físicoquímico Acoplado ( Coagulación - Floculación - Fenton ) Para El Tratamiento De Lixiviados Maduros,” no. March 2016, 2010.
- [22] J. A. B. Ramírez, D. B. Vicente, F. R. Vaquerizo, R. F. G. Hernández, and H. A. N. Aguilar, “Proceso Fenton para lixiviados pretratados biológicamente,” *Lacandonia*, vol. 10, no. 2, pp. 61–70, 2016.
- [23] M. N. Rojas Valencia, R. F. Alcántar Negrete, M. Vaca Mier, H. A. Nájera Aguilar, R. F. Gutiérrez Hernández, and J. A. Araiza Aguilar, *Generación, monitoreo, caracterización y tratamiento de lixiviados generados en sitios de disposición final: Una revisión de las acciones efectuadas en México*. Ciudad de México, 2021.
- [24] G. Lozano-Caballero, J. Bautista-Ramírez, M. Díaz-García, R. F. Gutiérrez-Hernández, R. I. Martínez-Salinas, and H. A. Nájera-Aguilar, “Remoción de carga orgánica en lixiviados por medio de un biofiltro empacado con residuos estabilizados,” *Rev. Espac. I+D Innovación más Desarro.*, vol. 5, no. 12, pp. 9–22, 2016, doi: 10.31644/imasd.12.2016.a01.
- [25] J. A. Bautista-Ramírez, H. A. Nájera Aguilar, R. I. Martínez-Salinas, V. Vera-Toledo, R. F. Gutiérrez Hernández, and Escobar-Castillejos, “Tratamiento de lixiviados en biorreactores empacados con materiales estabilizados,” *LACANDONIA*, vol. 11, pp. 85–90, 2017, [Online]. Available: [https://repositorio.unicach.mx/bitstream/handle/20.500.12753/1844/Tratamiento de lixiviados en biorreactores empacados con materiales estabilizados.pdf](https://repositorio.unicach.mx/bitstream/handle/20.500.12753/1844/Tratamiento%20de%20lixiviados%20en%20biorreactores%20empacados%20con%20materiales%20estabilizados.pdf)
- [26] J. A. Bautista, “Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios Usando Un Sistema De Biorreactores En Serie Empacados Con Materiales Estabilizados,” p. 3, 2018, [Online]. Available: <https://repositorio.unicach.mx/bitstream/handle/20.500.12753/670/2511.pdf?sequence=1>
- [27] S. C. Toalá Pérez, “Caracterización De Lixiviados En Un Biorreactor Con Residuos Estabilizados Del Sdf (Sitio De Disposición Final) De Berriozábal Chiapas,” pp. 1–50, 2019, [Online]. Available: [http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/3381/MDRPIB Q2019005.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/3381/MDRPIB%202019005.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [28] L. A. Perez Gomez, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIORREACTOR PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADO UTILIZANDO MATERIAL ESTABILIZADO DE BERRIOZÁBAL CHIAPAS,” INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ CHIAPAS, 2019.

- [29] A. Fabian Corrales, “REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS EN LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS, USANDO BIORREACTORES EMPACADOS CON DIFERENTES SUSTRATOS,” Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/4318>
- [30] PROFEPA, *LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE*. México, 2022. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-del-equilibrio-ecologico-y-la-proteccion-al-ambiente-63043>
- [31] PROFEPA, *LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS*. 2021. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos-62914>
- [32] SEGOB, *Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*. [Online]. Available: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004#gsc.tab=0)
- [33] SEGOB, *Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. 2021. [Online]. Available: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0)
- [34] INEGI, “Clima. Chiapas.” <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chis/territorio/clima.aspx?tema=me&e=07#:~:text=Clima.,Chiapas&text=Más de la mitad de,C en la Llanura Costeña>.
- [35] D. S. Mesías Shulca, “Revisión y análisis de bibliografía actualizada sobre el tratamiento anaeróbico de lixiviados de rellenos sanitarios municipales,” Universidad Técnica de Ambato, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/33661>
- [36] A. Noyola, J. M. Morgan-Sagatsume, and L. P. Güereca, *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales*. Ciudad de México, Primera ed. Universidad Autónoma de México, 2013. [Online]. Available: [http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia\\_Aguas\\_Residuales.pdf](http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf)
- [37] S. de M. A. e H. Natural, “Listado de rellenos sanitarios con sistemas de tratamiento de lixiviados,” 2021.
- [38] Y. I. Lara-Borrero J II, “Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte,” no. August, 2021.

- [39] S. A. Siddiqi, A. Al-Mamun, M. S. Baawain, and A. Sana, “A critical review of the recently developed laboratory-scale municipal solid waste landfill leachate treatment technologies,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 52, no. PA, p. 102011, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102011.
- [40] E. Gómez Vasquez, “Afectaciones de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios sobre el recurso agua,” Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [41] A. Fernández *et al.*, “Geografía y medio ambiente,” p. 366, 2021, [Online]. Available: [https://books.google.com.gt/books?id=d8QXEAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=el+medio+ambiente+es+lo+que+es&hl=es-419&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=el+medio+ambiente+es+lo+que+es&f=false](https://books.google.com.gt/books?id=d8QXEAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=el+medio+ambiente+es+lo+que+es&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=el+medio+ambiente+es+lo+que+es&f=false)
- [42] P. García, “Manejo y tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios: revisión bibliográfica y experiencia en Planta de Tratamiento de Lixiviados de Navarra,” *Espec. Espec. en Gerenc. Ambient. y Desarro. Sosten. Empres.*, pp. 1–15, 2019, [Online]. Available: <https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/677>
- [43] V. Torreta, N. Ferronato, I. A. Katsoyiannis, A. K. Tolkou, and M. Airoidi, “Novel and Conventional Technologies for Landfill Leachates Treatment: A Review,” *Sustainability*, vol. 9, 2017, doi: 10.3390/su9010009.
- [44] E. Giraldo, “Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances Recientes,” *Rev. Ing.*, vol. 14, pp. 44–55, 2001, doi: doi:10.16924/riua.v0i14.538.
- [45] M. de J. Corena Luna, “Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios,” Universidad de Sucre, 2008.
- [46] M. Luc, T. Olaya, J. Arley, and J. E. Mej, *Gerencia de instituciones de salud y Gestión ambiental*. 2013.
- [47] P. Andrés, “Manejo y tratamiento de lixiviados provenientes de residuos Management and treatment of leachate from urban solid waste .,” *Gerenc. Ambient. Y Desarro. Sosten. Empres.*, pp. 1–16, 2019, [Online]. Available: <https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/4586/Manejoytratamiento.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- [48] F. Morillo and E. F. Fajardo, “Estudio de los Reactores UASB Para el Tratamiento De Lixiviados Del Relleno Sanitario La Esmeralda,” 2005.
- [49] A. L. Gómez Blasco, *ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS MEDIANTE EVAPORACIÓN; CASO ESTUDIO: RELLENOS SANITARIOS RESA, S.A.*

- DE C.V., EN PUEBLA, PUE. 2016.
- [50] CONAGUA, *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente*. 28. 2019. [Online]. Available: [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
- [51] M. Márquez and S. Martínez, “Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA’s o UASB) Antología,” *Cent. Tecnológico Aragón*, p. 31, 2011.
- [52] A. Nath and A. Debnath, “A short review on landfill leachate treatment technologies,” *Mater. Today Proc.*, vol. 67, no. September, pp. 1290–1297, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.109.
- [53] H. I. SAS, *MANUAL DE OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y CONTROL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA*, no. 70. 2014.
- [54] A. Mojiri *et al.*, “Treatment of landfill leachate with different techniques: An overview,” *J. Water Reuse Desalin.*, vol. 11, no. 1, pp. 66–96, 2021, doi: 10.2166/wrd.2020.079.
- [55] W. A. P. P. Rathnayake and G. B. B. Herath, “A Review Of Leachate Treatment Techniques,” *9th Int. Conf. Sustain. Built Environ.*, pp. 97–106, 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/329915923>
- [56] N. Valencia and N. Rivera, “Estudio Preliminar Para El Tratamiento De Lixiviados En Un Reactor De Lodos Activados,” p. 94, 2003, [Online]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1075/1/noraximenariveraocampo.2003.pdf>
- [57] CONAGUA, *Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. 2015. [Online]. Available: [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
- [58] C. P. Álvaro, C. O. Nicolás D, and R. C. Tatiana, “Gestión Operativa en el Tratamiento de Lodos de Lixiviados Generados en el,” *RSDJ Bogotá D.C. Colomb. Semilleros*, vol. IV, no. 8, pp. 58–69, 2017, [Online]. Available: <http://revistas.fio.unam.edu.ar/index.php/semillero>
- [59] L. García Ramírez, *Manual Operación de plantas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados*, 2da edición. 2020.
- [60] A. Marín Ocampo and O. P. Manuel, *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados*. Guadalajara: Comisión Estatal del Agua de Jalisco, 2013.
- [61] C. V. Droppelmann and M. Oettinger, “Tratamiento en lodo activado del lixiviado de un relleno sanitario,” *Inf. Tecnol.*, vol. 20, no. 1, pp. 11–19, 2009, doi: 10.1612/inf.tecnol.3916it.07.
- [62] P. Torres Lozada, J. A. Rodríguez, L. E. Barba, A. Morán, and J. Narváez, “Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores UASB,” *Ing. y Desarro.*, vol. 18, pp. 50–60, 2005, [Online].

Available: <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=85201804>

- [63] Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento, *Volumen 33 Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos de Oxidación Bioquímica con Biomasa Suspendida*. 2016. [Online]. Available: <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- [64] C. C. Velandia Ramos, *EVALUACION DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS PARA LA REMOCION DE CARGA ORGANICA EN LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS GENERADAS EN EL COLEGIO SAN VIATOR*, vol. 13, no. 3. 2017.
- [65] A. A. Bakar, Z. Daud, Z. Ahmad, and M. A. A. Othman, "Treatment of Leachate Using Sequencing Batch Reactor ( SBR )," *Eprints.Uthm.Edu.My*, 2012, [Online]. Available: [http://eprints.uthm.edu.my/2549/1/Treatment\\_of\\_Leachate\\_Using\\_Sequencing\\_Batch\\_Reactor\\_\(SBR\).pdf](http://eprints.uthm.edu.my/2549/1/Treatment_of_Leachate_Using_Sequencing_Batch_Reactor_(SBR).pdf)
- [66] D. Arcos Núñez, "Análisis de alternativas para el tratamiento de efluentes industriales de curtiembres," vol. 8, pp. 1–146, 2017.
- [67] F. Fernández-Polanco and L. Seghezzeo, *Diseño de reactores Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB). Mejora de Las Economías Regionales y Desarrollo Local*. INTI, 2015. [Online]. Available: <http://www.ue-inti.gob.ar/pdf/publicaciones/cuadernillo15.pdf>
- [68] G. Duncan, S. P. J.T, and S. Lynn, "Spray irrigation of landfill leachate: estimating potential exposures to workers and bystanders using a modified air box model and generalised source term," *Environ. Pollut.*, vol. 133, no. 3, pp. 587–599, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.06.010>.