



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

Tesis

***“Evolución de las características fisicoquímicas del lixiviado
generado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente”***

Que para obtener en Título de
Ingeniero Químico

Presenta:

René Francisco Alcántar Negrete

Asesora: **Dra. María Neftalí Rojas Valencia**

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

U. N. A. M.
ASUNTO: **VOTO APROBATORIO**



**ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis**

Estudio de la evolución del lixiviado generado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente.

Que presenta el pasante: **René Francisco Alcántar Negrete**

Con número de cuenta: **086530060** para obtener el Título de la carrera: **Ingeniería Química**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 19 de Marzo de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. René Miranda Ruvalcaba	
VOCAL	I.Q. Graciela Ruth Delgadillo García	
SECRETARIO	Dra. María Nefialí Rojas Valencia	
1er. SUPLENTE	Dra. Abigail Martínez Estrada	
2do. SUPLENTE	M. en I. Julio César Morales Mejía	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

IHM/mmgm*

DEDICATORIA

A mis abuelas Carmen y Juana, mis abuelos Baldomero y Francisco, que ya se han ido y que en vida me enseñaron e impulsaron a seguir siempre adelante. Por las palabras de aliento que me dieron para luchar y ser persistente sin importar los obstáculos que se presentaran. Por decirme que si tenía un sueño, debía protegerlo, y si quería algo, tenía que ir a conseguirlo, que nunca tuviera miedo a fallar; que cuando callera había que levantarse con más fuerza y caminar siempre adelante.

A Maira, por enseñarme con su valor y fortaleza a luchar por la vida y decirme que lo trascendental era alcanzar la meta, sin importa el lugar y el tiempo en que se arribe.

Gracias por iluminarme y guiarme desde el cielo.

A ellos, con quienes que en vida no fue posible compartir este logro.

Lucha por lo que en realidad deseas y ama de verdad a la vida, no te atormentes por el futuro que aún no ha llegado, vive el presente, anuqué no sea el que esperabas y conviértelo, constrúyelo tan hermoso y bello que cuando lo recuerdes lo disfrutes nuevamente.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado salud y fortaleza.

A mi esposa Ana María, mi único y gran amor, quien ha creído siempre en mí y me ha apoyado de forma incondicional, a quien he robado parte de su tiempo para lograr este objetivo, por su paciencia y comprensión.

A mis padres: Ma. Remedios y Julio, que siempre me han enseñado a trabajar con tenacidad, a luchar para lograr las metas que uno se traza en la vida, que gracias a ustedes, nunca desvié mi objetivo a pesar de las adversidades y el paso de los años.

A mis hermanos: Clara Lila, Jorge, Hayde, Araceli, Angelina Osebel, Ramex David y Yesica Eréndira, porque siempre han sido el motivo para seguir adelante.

A la Dra. María Neftalí Rojas Valencia del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por haberme guiado en este proyecto, por su valioso apoyo y comprensión, a sus acertados comentarios, además de sus palabras de aliento para no desistir.

A toda mi familia, amigos y compañeros de la carrera y en especial a los maestros que siempre me tuvieron paciencia.

RECONOCIMIENTO

El presente estudio fue posible gracias al Ing. Rosalio Nava Santillán, Director de Transferencia y Disposición Final, al Ing. Javier Licea Nogues, Subdirector de Operación Disposición Final, por haber dado las facilidades y permitir el acceso y manejo de información, de igual forma al Ing. José Pérez Rosas, Jefe de la Unidad Departamental de Sistemas de Disposición Final, quien fue la persona encargada para brindarme el apoyo con la información referente al Relleno Sanitario Bordo Poniente, así como sus conocimientos, comentarios y su gran apoyo en todo momento.

Al Ing. Ricardo Estrada Núñez, Subdirector de Reciclaje y a la QFB. Ana María Vázquez Campos, Responsable del Monitoreo Ambiental, por haber facilitado los informes impresos de monitoreo de lixiviado del Relleno Sanitario Bordo Poniente del año 1996 a 2004, así como la información en archivo electrónico de los informes del monitoreo de lixiviado del año 2005 a 2014.

Al Subdirector de Operación de Transferencia Antonio Terrazas Aguirre y al Jefe de la Unidad Departamental de Sistemas de Tratamiento Argel Franco López, por las facilidades otorgadas para la elaboración de este trabajo, además por sus palabras de aliento, consejos y comprensión, muchas gracias.

A quienes en forma directa o indirecta han participado en las labores del Área de Monitoreo; al personal del Laboratorio Central de Biología Ambiental, donde se han realizado los análisis al lixiviado. Gracias al trabajo y dedicación de todos ellos se pudo concretar el presente estudio. De manera general a todo el personal de la DTDF de la Dirección General de Servicios Urbanos del Gobierno del Distrito Federal.

Reflexiones

Hace mucho tiempo tuve una ilusión, un sueño y hoy se hace realidad.

Aunque muchas veces me pregunte, si en verdad valdría la pena dejar la vida en desvelos, apuntes, exámenes y en los libros y la respuesta la tengo hoy. No hay respuesta más gratificante que la de llegar a la meta.

No te rindas, aun estas a tiempo de alcanzar y comenzar de nuevo, aceptar tus sombras, enterrar tus miedos, liberar el lastre, retomar el vuelo.

No te rindas que la vida es eso, continuar el viaje, perseguir tus sueños, destrabar el tiempo, correr los escombros y destapar el cielo.

No te rindas, por favor no cedas, aunque el frío queme, aunque el miedo muerda, aunque el sol se esconda y se calle el viento, aún hay fuego en tu alma, aún hay vida en tus sueños, porque la vida es tuya y tuyo también el deseo, porque lo has querido y porque te quiero.

Vivir la vida y aceptar el reto, recuperar la risa, ensayar el canto, bajar la guardia y extender las manos, desplegar las alas e intentar de nuevo, celebrar la vida y retomar los cielos, ...

Mario Benedetti (fragmento)

-----~-----

Que tu andar por la vida te sea placido y alegre, entre el ruido y las adversidades, piensa en la paz y la tranquilidad que puedes encontrar en tus recuerdos, buenos o malos, pues, ellos son parte de tu historia, son parte de tu vida. Disfruta de los fracasos y éxitos, porque al final de la jornada, los dos siempre nos hacen sonreír.

Obedece dócilmente los consejos que te pueda brindar la edad. Fortalece tu espíritu, para que los años venideros sean los más hermosos y llevaderos.

Estos pequeños secretos harán que conozcas tu paz interior y que éste conocimiento te lleve a disfrutar cada detalle de tu vida.

Un viejo amigo, es la tierra que se sembró con paciencia y al paso de los años, la cosecha es el agradecimiento por el tiempo compartido y los consejos recibidos.

¿?

-----~-----

Nunca me doy cuenta de lo que he hecho, sino de lo que falta por hacer.

M. Curi

-----~-----

Thanks for encouraging me to go ahead.

No matter how many mistakes you make or how slow you progress, you are still way ahead of everyone who is not trying.

Tony Robbins

-----~-----

If I have seen further, it is because I've stood on the shoulders of giants

Isaac Newton

-----~-----

All your dreams can come true, if you have the courage to pursue them.

¿?

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

ABREVIATURAS

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Justificación	4
1.2. Objetivos	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Definición de residuos sólidos urbanos	6
2.1.1. Composición típica de los residuos sólidos urbanos	.6
2.2. Sitio no controlado y tiradero a cielo abierto	9
2.3. Relleno sanitario	10
2.4. El lixiviado	12
2.4.1. Definición de lixiviado	12
2.4.2. Características de lixiviado	13
2.4.3. Generación de lixiviado en rellenos sanitarios	15
2.4.4. Composición típica del lixiviado	21
2.5. Reglamentación relativa al lixiviado	23
2.5.1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	24
2.5.2. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	25
2.5.3. Normas Oficiales Mexicanas	28
2.6. Lineamiento de España y Estados Unidos de Norte América, referente al monitoreo de lixiviado	30
2.6.1. Ministerio del Medio Ambiente Español	30
2.6.2. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norte América	31
3. ANTECEDENTES	34
3.1. Ubicación del Relleno Sanitario Bordo Poniente (Área de estudio)	46

4. METODOLOGÍA	48
4.1. Primera fase: Análisis documental	48
4.1.1. Muestreo y métodos de análisis fisicoquímicos	49
4.1.1.1. Muestreo	49
4.1.1.2. Métodos empleados para el análisis fisicoquímicos del lixiviado	57
4.2. Segunda fase: análisis fisicoquímicos	59
4.2.1. Parámetros analizados	59
4.2.1.1. pH	62
4.2.1.2. Demanda química de oxígeno	63
4.2.1.3. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	64
4.2.1.4. Grasas y aceites	65
4.2.1.5. Sólidos totales volátiles	66
4.2.1.6. Sólidos suspendidos totales	66
4.3. Tercera fase: Determinación en laboratorio las características fisicoquímicas para el año 2014	67
5. RESULTADOS	68
5.1. Parámetros fisicoquímicos evaluados	68
5.1.1. pH	68
5.1.2. Demanda química de oxígeno (DQO)	69
5.1.3. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	70
5.1.4. Grasas y aceites	71
5.1.5. Sólidos totales volátiles	71
5.1.6. Sólidos suspendidos totales	72
5.2. Comparativo de datos	73
5.3. Resultados correspondientes al año 2014	82
5.4. Gráficas de los resultados en los parámetros evaluados	85
6. CONCLUSIONES	114
7. RECOMENDACIONES	115
8. REFERENCIAS	120

LISTA DE FIGURAS

Figura	Nombre	Página
2-1	Preparación de residuos para realizar el cuarteo. ^a	7
2-2	Clasificación de subproductos. ^a	7
2-3	Fracciones principales encontradas en el estudio de generación domiciliaria.	8
2-4	Comportamiento de disposición de RSU en México.	11
2-5	Comparativo de disposición final de los RSU en México de rellenos sanitarios y sitios no controlados por tipo de localidad en 2008.	12
2-6	Preparación de muestra de lixiviado para realizar pruebas de dosificación de reactivos en el tratamiento fisicoquímico “Prueba de jarras”. ^a	14
2-7	Diagrama de la etapa anaerobia de reacción de la materia orgánica en un relleno sanitario.	16
2-8	Aporte en cada una de las fases de reacción al biogás y lixiviado.	16
2-9	Fases de generación de biogás y características de lixiviado en un relleno sanitario.	18
2-10	Migración de sustancias al lixiviado en relación a las fases (edad) en que se encuentra en un relleno.	20
3-1	Operación del RSBP, recepción y cubierta de los RSU en la Etapa 1. ^a	34
3-2	Operación en la Etapa 4, formación del talud, compactación, recepción y cubierta de los RSU. ^a	35
3-3	Barrera forestal en la Etapa 3.	35
3-4	Riego de caminos para reducir tolvaneras.	36
3-5	Vista de la cubierta final en la Etapa 2.	36
3-6	Conservación como área verde ya saneada en la Etapa 3.	37
3-7	Conformación del talud en la Etapa 4. ^a	38
3-8	Generación de residuos sólidos por delegación en toneladas. ^c	39
3-9	Transporte de Residuos dentro de la Etapa 4.	40
3-10	Impermeabilización de la celda en la base del relleno (colocación de la geomembrana). ^a	41
3-11	Protección de la geomembrana.*	41
3-12	Vista parcial de la instalación de infraestructura para la recirculación de lixiviado. ^a	42
3-13	Preparación del sistema de bombeo portátil para la recirculación de lixiviado en la Etapa 2.	42
3-14	Tinas de evaporación de lixiviados en la Etapa 4.	44
3-15	Planta de tratamiento fisicoquímico de lixiviado en la Etapa 1.	44
3-16	Planta de tratamiento fisicoquímico de lixiviado en la Etapa 2.	45
3-17	Planta de tratamiento de lixiviado por osmosis inversa en la Etapa 4.	45
3-18	Posición geográfica del Distrito Federal y el Relleno Sanitario Bordo Poniente.	46
3-19	Ubicación geográfica del Relleno Sanitario Bordo Poniente y su distribución.	47
4-1	Muestreos de lixiviado y medición de parámetros en campo.	49
4-2	Pozo de extracción y monitoreo de lixiviado en la Etapa 1.	50
4-3	Pozo de extracción y monitoreo de lixiviado en la Etapa 3.	50
4-4	Ubicación de los puntos de monitoreo en la 1ª etapa del RSBP. ^b	53
4-5	Ubicación de los puntos de monitoreo en la 2ª etapa del RSBP. ^b	54
4-6	Ubicación de los puntos de monitoreo en la 3ª etapa del RSBP. ^b	55
4-7	Ubicación de los puntos de monitoreo en la 4ª etapa del RSBP. ^b	56
4-8	Determinación de DQO y grasas y aceites en el Laboratorio Central de Biología Ambiental de la DTDF.	57
5-1	Tendencia del pH en función al tiempo en el relleno sanitario en el año 2003.	79
5-2	Tendencia de la DQO en función al tiempo en el relleno sanitario en el año 2007.	79
5-3	Tendencia de la DBQ ₅ en función al tiempo en el relleno sanitario en el año 2007.	80

Figura	Nombre	Página
5-4	Sales que se generan en la superficie de la cubierta final de los desechos sólidos en la Etapa 1.	80
5-5	Comportamiento del pH en el lixiviado de la Etapa 1.	86
5-6	Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 1.	87
5-7	Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 1.	88
5-8	Comportamiento de las grasas y los aceites en el lixiviado de la Etapa 1.	89
5-9	Comportamiento de los sólidos totales volátiles en el lixiviado de la Etapa 1.	90
5-10	Comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el lixiviado de la Etapa 1.	91
5-11	Comportamiento de la relación DBO ₅ /DQO en el lixiviado de la Etapa 1.	92
5-12	Comportamiento del pH en el lixiviado de la Etapa 2.	93
5-13	Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 2.	94
5-14	Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 2.	95
5-15	Comportamiento de las grasas y los aceites en el lixiviado de la Etapa 2.	96
5-16	Comportamiento de los sólidos totales volátiles en el lixiviado de la Etapa 2.	97
5-17	Comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el lixiviado de la Etapa 2.	98
5-18	Comportamiento de la relación DBO ₅ /DQO en el lixiviado de la Etapa 2.	99
5-19	Comportamiento del pH en el lixiviado de la Etapa 3.	100
5-20	Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 3.	101
5-21	Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 3.	102
5-22	Comportamiento de las grasas y los aceites en el lixiviado de la Etapa 3.	103
5-23	Comportamiento de los sólidos totales volátiles en el lixiviado de la Etapa 3.	104
5-24	Comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el lixiviado de la Etapa 3.	105
5-25	Comportamiento de la relación DBO ₅ /DQO en el lixiviado de la Etapa 3.	106
5-26	Comportamiento del pH en el lixiviado de la Etapa 4.	107
5-27	Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 4.	108
5-28	Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 4.	109
5-29	Comportamiento de las grasas y aceites en el lixiviado de la Etapa 4.	110
5-30	Comportamiento de los sólidos totales volátiles en el lixiviado de la Etapa 4.	111
5-31	Comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el lixiviado de la Etapa 4.	112
5-32	Comportamiento de la relación DBO ₅ /DQO en el lixiviado de la Etapa 4.	113
8-1	Desarrollo de formas tipo "coralino", que en su interior atrapan lixiviado.	116
8-2	Lixiviado en el interior de un "tubo".	116
8-3	Fotografías de algunos organismos en un charco de lixiviado (aparentemente diluido) con pH de 8.5 en la Etapa 1	117
8-4	Crecimiento de algas en un charco de lixiviado con pH=8.5 (aparentemente diluido), en la Etapa 1.	118
8-5	Especies vegetales que se han adaptado junto al canal recolector de lixiviado en la etapa 1.	118
8-6	Plantas que obtienen sus requerimientos de humedad del lixiviado en la etapa 1.	119

Notas:

- (a) Estas figuras (fotografías) son propiedad de DGSU/DTDF/SODF/JUD de Sistemas de Disposición Final y fueron publicadas previa autorización del Ing. José Pérez Rosas.
- (b) Estas figuras corresponden a los diagramas de ubicación de los pozos de monitoreo y fueron proporcionados por el Ing. José Pérez Rosas, JUD de Sistemas de Disposición Final.
- (c) Estas figuras (fotografías) son propiedad de Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México, 2013.

LISTA DE TABLAS

Tabla	Nombre	Página
2-1	Composición física porcentual de los residuos sólidos en el Distrito Federal.	9
2-2	Transformación de los residuos sólidos en biogás y el aporte al lixiviado dentro de un relleno sanitario, adaptado de Kiss <i>et al.</i>	15
2-3	Recepción típica de electrones en reacciones bacterianas.	17
2-4	Características de lixiviado en un relleno sanitario, fragmento Johannessen.	21
2-5	Características de lixiviado según su edad en un relleno sanitario, fragmento Johannessen.	21
2-6	Comparativo de concentraciones típicas entre el lixiviado de un relleno sanitario con agua y agua subterránea según Bhalla y colaboradores.	21
2-7	Análisis de lixiviado en Noruega y el noroeste de Estados Unidos de Norte América.	22
2-8	Caracterización de lixiviado para diferentes países por Martin Carville y Howard Robinson.	22
2-9	Límites máximos permisibles de aguas (fragmento NOM-002-SEMARNAT-1996).	28
2-10	Límites máximos permisibles de agua según la NOM-001-ECOL-1996.	29
2-11	Frecuencia de monitoreo de acuerdo a la normatividad de España.	30
2-12	Frecuencia mínima de control exigidos por el Reglamento de Rellenos Sanitarios.	32
3-1	Superficie que ocupa el Relleno Sanitario Bordo Poniente en cada una de sus cuatro etapas y el periodo en el que operó cada una.	39
4-1	Puntos de monitoreo en las etapas 1, 2 y 3 del RSBP.	51
4-2	Puntos de monitoreo en la etapa 4 del RSBP.	52
4-3	Normas Mexicanas empleadas en el análisis de lixiviado.	58
4-4	Rango de valores permitidos para algunas características propias del <i>agua</i> según la normatividad oficial de México (adaptado).	61
4-5	Clasificación del lixiviado de acuerdo a sus propiedades.	61
4-6	Intervalo de concentración de contaminantes en lixiviados provenientes de residuos sólidos municipales en Estados Unidos de Norte América (fragmento).	62
4-7	Concentraciones límite para la descarga de lixiviado previamente tratado, de acuerdo a las normas alemanas.	62
5-1	Resumen del comportamiento del pH en lixiviado en el RSBP.	69
5-2	Clasificación del lixiviado de acuerdo al pH.	69
5-3	Resumen del comportamiento de la demanda química de oxígeno en lixiviado en el RSBP.	70
5-4	Clasificación del lixiviado de acuerdo a la DQO.	70
5-5	Resumen del comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en lixiviado en el RSBP.	70
5-6	Clasificación del lixiviado de acuerdo a la DBO ₅ .	71
5-7	Resumen del comportamiento de las grasas y aceites en lixiviado en el RSBP.	71
5-8	Resumen del comportamiento de los sólidos totales volátiles en lixiviado en el RSBP.	72
5-9	Resumen del comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el relleno.	72
5-10	Composición promedio del lixiviado en el RSBP en cada una de sus cuatro etapas (datos obtenidos en este estudio).	73
5-11	Valores mínimos y máximos para cada una las propiedades en el periodo 1996 a 2014 de la Etapa 1 del RSBP.	74
5-12	Valores mínimos y máximos para cada una las propiedades en el periodo 1996 a 2014 de la Etapa 2 del RSBP.	75
5-13	Valores mínimos y máximos para cada una las propiedades en el periodo 1996 a 2014 de la Etapa 3 del RSBP.	76
5-14	Valores mínimos y máximos para cada una las propiedades en el periodo 1996 a 2014 de la Etapa 4 del RSBP.	77

Tabla	Nombre	Página
5-15	Comparativo de características del lixiviado del Relleno Sanitario Bordo Poniente respecto a otros países.	78
5-16	Análisis de lixiviado de la etapa 1 del RSBP de 2014.	82
5-17	Análisis de lixiviado de la etapa 2 del RSBP de 2014.	82
5-18	Análisis de lixiviado de la etapa 3 del RSBP de 2014.	83
5-19	Análisis de lixiviado de la etapa 4 del RSBP de 2014.	83
5-19-1	(continuación) Análisis de lixiviado de la etapa 4 del RSBP de 2014.	84
5-20	Análisis de lixiviado realizado en los laboratorios de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería de la UNAM.	84

ABREVIATURAS

3R	Reducir, Reutilizar y Reciclar
COT	Carbón orgánico total
COV's	Compuestos orgánicos volátiles
CRETIB	Corrosivo, reactivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
DGSU	Dirección General de Servicios Urbanos
DQO	Demanda química de oxígeno
DTDF	Dirección de Transferencia y Disposición Final
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norte América
G y A	Grasas y aceites
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
LCBA	Laboratorio Central de Biología Ambiental
JUDSDF	Jefatura de Unidad Departamental de Sistemas de Disposición Final
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
PET	polietilen-tereftalato
pH	Potencial de hidrógeno
RSBP	Relleno Sanitario Bordo Poniente
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEMARNAT	Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SODF	Subdirección de Operación de Disposición Final
SST	Sólidos suspendidos totales
SVT	Sólidos totales volátiles

RESUMEN

El objetivo de esta investigación, fue analizar cómo ha ido cambiando la composición fisicoquímica del lixiviado generado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente, como parte del monitoreo para detectar condiciones de riesgo al ambiente, por la generación de lixiviado. Para cumplir con el objetivo general y específico, la metodología se dividió en tres fases: en la primera se realizó un análisis documental del comportamiento fisicoquímico del lixiviado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente, durante la operación y pos-clausura (del año 1996 al 2014). En la segunda fase se evaluaron y analizaron parámetros esenciales como pH, DQO, DBO₅, grasas y aceites, sólidos totales volátiles y sólidos suspendidos totales. Durante la operación y pos-clausura se efectuó un monitoreo de manera mensual a cada uno de los puntos que conforman las cuatro etapas del relleno, la frecuencia de muestreos disminuyó desde el 2009 al 2014. En la tercera fase se determinaron en laboratorio las características fisicoquímicas de los lixiviados para el año 2014 y se evaluó la composición química para conocer el grado de estabilización del lixiviado y contar con información pertinente que permitiera apreciar posibles impactos ambientales.

Los resultados mostraron que el pH se mantiene constante con el paso del tiempo, ya que se observan pequeñas variaciones, aunque presenta valores mínimos de 6.29 a máximos de 10.8 y en promedio 8.20 en las diferentes etapas. La DQO mostro una variación muy amplia, en la etapa tres en promedio se registraron concentraciones mínimas de 1,492.93 mg/L, mientras que en la etapa cuatro se registraron las concentraciones máximas de 5,127.32 mg O₂/L. Con respecto a la DBO₅ los valores promedio encontrados, fueron de 184.28 en la etapa tres y los máximos de 608.14 mg/L en la etapa cuatro. Por lo que toca a grasas y aceites en promedio el mínimo fue de 104.61 mg/L en la etapa 3 y de 165.06 mg/L en la etapa cuatro. Los Sólidos totales volátiles oscilaron de 1,573.53 mg/L a 3,595.22 mg/L respectivamente, mientras que los sólidos suspendidos totales variaron de 109.70 mg/L en la etapa tres a 383.78 mg/L en este caso en la etapa dos.

Con base en la mayoría de los resultados obtenidos (del año 1996 al 2014), se puede concluir que los lixiviados se clasifican como “*maduros*” o “*viejos*”, lo que indica que a pesar de ser un lixiviado “*viejo*” se deben seguir supervisando los efectos fisicoquímicos que permitan darle un tratamiento adecuado, debido a sus características. Bordo Poniente está constituido por cuatro áreas denominadas etapas 1, 2, 3 y 4; en la etapa uno, a pesar de que fue clausurada hace 22 años muestra la necesidad de continuar monitoreando, al lixiviado ya que aún puede tener impactos ambientales.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que ha acompañado al hombre en su paso por los años, ha sido el de la generación de desechos, producto de los materiales que usa para la sobrevivencia, desechos de alimentos o los residuos de la construcción (estos últimos también denominados inertes). En los últimos años esto se ha empeorado, pues estamos acostumbrándonos a usar y tirar, generando cada día más desechos. La forma usual de depositar los desechos fue en tiraderos a cielo abierto, dando origen a productos de su descomposición que pueden contaminar aire, suelo y agua del ambiente natural que rodea estos sitios, lo que provocaba la proliferación de fauna nociva y como consecuencia la propagación de enfermedades. Para minimizar la contaminación, se han utilizado diversos métodos de eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU), como son: incineración, pirolisis y gasificación, entre otros. En México hoy en día el método, por cuestiones financieras, más aceptado de disposición final de los RSU es la técnica de relleno sanitario, método que se encuentra regulado por la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 *“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”*.

El compromiso que debemos establecer, como habitantes de este planeta, es el de crear las condiciones necesarias para alcanzar un Desarrollo Sustentable^[16], el cual es *“El proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras”*, (Art 3º, párrafo XI de la LGEEPA). Ya que es la forma de desarrollo o progreso que satisfaga las necesidades del presente, sin comprometer los recursos de las futuras generaciones.^[31] Es decir, el progreso actual debe garantizar la salud del individuo y de los recursos naturales al paso del tiempo.

Como reto del desarrollo o crecimiento sustentable en los ámbitos económico, social, cultural y ambiental, significa que este debe ser de forma permanente a travez del tiempo para mejorar la calidad de vida, además del ámbito ambiental, mantener los recursos naturales, así como los

ecosistemas y conservar la diversidad biológica, esto incluye la reincorporación de los desechos producidos tanto por la población, como por los procesos industriales a los ciclos biogeoquímicos. Esta actividad implica **Reducir, Reutilizar y Reciclar (3R)** las aguas residuales o los desechos, llámense residuos sólidos urbanos o municipales, a lo que coloquialmente se le ha denominado “*basura*”, es importante también aplicar las 3R’s a las aguas residuales.

Para lograr esta meta se requiere del compromiso de todos los grupos sociales y tratar de alcanzar este principio, para conservar nuestro ambiente, se requiere del adecuado manejo de los RSU y el correcto manejo de los subproductos que se generan: residuos orgánicos (para elaborar composta) e inorgánicos reciclables (para la industria del reciclamiento), así como del biogás y lixiviado que se produce durante la descomposición de los RSU. Esto se convierte en una actividad prioritaria en la operación y mantenimiento de los rellenos sanitarios a nivel mundial.

La conformación del lixiviado varía según la zona y la época del año, puede contener iones amonio, compuestos orgánicos^[14] e inorgánicos y un gran número de contaminantes a diferentes niveles de concentración en forma disuelta o en suspensión, por su heterogeneidad y complicada composición logran impactar al ambiente^[13], esto, debido a que el relleno sanitario se trata de un gran reactor en el que se presentan interacciones bioquímicas y fisicoquímicas de acuerdo con la naturaleza de los desechos y las condiciones físicas y climatológicas del lugar, en el cual se generan nuevos constituyentes además de los que ya estaban presentes en los RSU, los que a veces son solubilizados y mezclados con los de nueva creación.

1.1. Justificación

La generación de los residuos sólidos es inevitable, debido al consumo de bienes para el “*sustento*” de los humanos, aunado a ello el inadecuado manejo de los residuos sólidos, trae como consecuencia de la degradación de los materiales constituyentes de los RSU, la percolación de agua de lluvia más la humedad contenida en los residuos que se mezcla con el líquido producto de la descomposición de los RSU y al combinarse con el agua de las posibles infiltraciones a los mantos freáticos, cuando no se tiene una barrera adecuada de impermeabilización, se origina el líquido de compleja composición denominado lixiviado.

Debido a la complicada composición del lixiviado y su peligrosidad como posible contaminante de suelos, aguas superficiales y subterráneas, que se puede presentar por escurrimientos no controlados o por infiltración a través de formaciones permeables, genera la afectación de los acuíferos provocando que sean inutilizados por grandes periodos de tiempo, ya que su regeneración toma muchos años, por lo que es importante conocer su comportamiento para tomar la mejor decisión en función a la forma de manipulación, ya sea para recircularse en el propio relleno sanitario o para dar algún tratamiento que cambie sus características y pueda usarse de acuerdo a la demanda del líquido tratado, siempre y cuando cumpla con la normatividad vigente para su uso.

Las actividades de monitoreo y tratamiento adecuado del lixiviado generado en el Relleno Sanitario de Bordo Poniente, deben conducir al manejo adecuado de este líquido, para que al ser empleado en la recirculación o tratado por algún método, permita la conservación de la salud humana de las personas que habitan los municipios circundantes al Relleno Sanitario Bordo Poniente y en general al cuidado del ambiente.

En esto radica la importancia de realizar el presente estudio sobre las propiedades físicoquímicas del lixiviado, desde el año de 1996 hasta el 2014, cabe señalar que el Relleno Sanitario Bordo Poniente está conformado por 4 etapas, del cual se cuenta con una gran cantidad de datos que no se habían correlacionado, en consecuencia no se contaba con un estudio del comportamiento de lixiviado para estas zonas en forma global y para cada una de las etapas que lo conforman. Se pretende que el presente análisis sirva como base para otros estudios que se requieran.

1.2. Objetivos

Objetivo general:

Analizar cómo ha ido cambiando la composición fisicoquímica del lixiviado generado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente, como parte del monitoreo para detectar condiciones de riesgo al ambiente por la generación de lixiviado.

Objetivos específicos:

1. Hacer un análisis documental para obtener la información pertinente que permita estudiar el comportamiento fisicoquímico del lixiviado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente, durante la operación y pos-clausura.
2. Analizar los resultados de la caracterización fisicoquímica del lixiviado desde la etapa de operación y hasta la pos-clausura. Desde el año 1996, a cada una de las cuatro etapas que conforman el relleno, al año 2014 posterior a la clausura.
3. Determinar en laboratorio las características fisicoquímicas del lixiviado durante el año 2014 y evaluar su composición química y con esto, conocer el grado de estabilización del lixiviado, para contar con información pertinente que permita apreciar posibles impactos ambientales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de residuos sólidos urbanos

De acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003, en su punto 4.37 define a los Residuos Sólidos Urbanos como: *“Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con característica domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos”*.

2.1.1. Composición típica de los residuos sólidos urbanos

Los factores que influyen de manera directa en la composición de los RSU son: nivel socioeconómico, época del año, día de la semana, costumbres o hábitos y zona domiciliaría de recolección. En el estudio de la composición de los residuos sólidos urbanos, se requiere aplicar la normatividad mexicana que para este caso es la NMX-AA-15-1985^[22] *“Protección al ambiente - contaminación del suelo – residuos Sólidos municipales - muestreo - método de cuarteo”*. En esta norma se establece el método de cuarteo para residuos sólidos municipales y la obtención de especímenes para los análisis en el laboratorio. En la figura 2-1 se muestra la preparación típica de los residuos para realizar el cuarteo y de la clasificación de subproductos, ver figura 2-2.



Figura 2-1. Preparación de residuos para realizar el cuarteo.



Figura 2-2 Clasificación de subproductos.

Se han clasificado en 31 subproductos^[31] catalogados en tres fracciones, obteniendo así que 55.58% corresponde a la fracción orgánica; 20.30% a subproductos que presentan un grado importante de reciclamiento como son: el polietilen-tereftalato (PET), papel, cartón, vidrio transparente y de color, plástico rígido, lata, materiales ferrosos, aluminio y, por último, 24.12% de subproductos de bajo valor en la comercialización. La base de estudio estimada fue de 143.5 kg/m³.

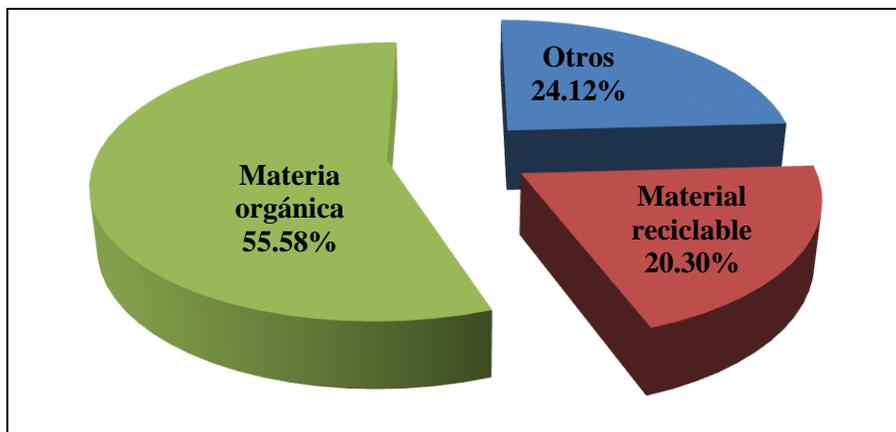


Figura 2-3. Fracciones principales encontradas en el estudio de generación domiciliaria. Fuente: Secretaría del Medio Ambiente, 2009.

El Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal en coordinación con Instituciones de Educación Superior realizaron un estudio más detallado sobre la composición física porcentual de los RSU en las trece estaciones de transferencia del D. F., encontrando 51 subproductos como se muestra en la tabla 2-1.

Tabla 2-1. Composición física porcentual de los residuos sólidos en el Distrito Federal.^[31]

No.	Subproducto Promedio	(%)	No.	Subproducto Promedio	(%)
1	Algodón	0.30	27	Papel Bond	2.09
2	Cartón liso	3.09	28	Periódico	1.68
3	Cartón corrugado	2.77	29	Revista	0.63
4	Otros cartones	0.50	30	Papel higiénico	6.72
5	Envase de cartón tetrapak ^{MR}	1.51	31	Pañal desechable, toallas femeninas	2.83
6	Cuero	0.33	32	PET (Polietilen-tereftalato)	2.80
7	Residuo Fino	2.68	33	HDPE-PEAD (Polietileno de alta densidad)	2.92
8	Residuo grueso	1.71	34	PVC (Policloruro de vinilo)	0.15
9	Fibra dura vegetal	0.50	35	LDPE-PEBD (Polietileno de baja densidad)	5.44
10	Fibra sintética	0.49	36	PP(Polipropileno)	0.92
11	Hueso	0.70	37	PS(Poliestireno)	0.98
12	Llantas de automóvil	0.48	38	Alimenticios	34.87
13	Llantas de camioneta	0.06	39	Residuos de jardinería	9.18
14	Llantas de camión	0.37	40	Trapo	2.94
15	Otros hules	0.17	41	Vidrio Transparente	1.74
16	Lata aluminio	0.27	42	Vidrio de color	0.74
17	Lata metálica	1.46	43	Tenis	0.20
18	Losa y cerámica	0.53	44	Zapatos	0.44
19	Madera	1.95	45	Bajo alfombra, Borra	0.00
20	Material construcción	1.75	46	Cera parafina	0.00
21	Material ferroso	0.37	47	Chácharas	0.00
22	Aluminio	0.07	48	Muebles	0.00
23	Bronce	0.03	49	Fibra de vidrio	0.43
24	Cobre	0.02	50	Colchón	0.00
25	Pilas eléctricas	0.07	51	Electrónicos	0.11
26	Acero inoxidable	0.02		Total	100.00

2.2. Sitio no controlado y tiradero a cielo abierto

El rechazo de los residuos sólidos, es la fracción que no ha sido separada para que se recicle y se debe depositar. Históricamente, esta actividad, se ha realizado sobre la superficie terrestre o en los océanos.^[36]

En la actualidad, existen lugares donde no se tiene el adecuado control en la forma en que se disponen y se realiza de forma inapropiada y hasta de manera clandestina en lugares no controlados o a cielo abierto. Este tipo de terrenos se le denomina **Sitio no controlado**, que es un predio inapropiado de disposición de “*basura*”, lugar que no cumple con las especificaciones de un relleno sanitario, y en esta clasificación también se encuentran los **tiraderos a cielo abierto**, que generalmente son tiraderos clandestinos donde prolifera la fauna nociva; además, debido a que carece de cualquier infraestructura para el manejo de lixiviados, estos pueden llegar a contaminar los mantos freáticos. Hay que recordar que

cuando los RSU no se manejan o disponen de manera apropiada, tiene repercusiones en la calidad del aire, agua y suelo.^[32]

2.3. Relleno sanitario

La operación de disposición final de los residuos sólidos, implica de una buena planeación que involucra diversas áreas, ya sea científica en las áreas ingenieriles, económica y ambiental, para que la disposición final de los residuos sea la adecuada; esta operación se refiere al depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones planeadas y controladas, diseñadas para minimizar el impacto ambiental, a estas instalaciones se les ha denominado **rellenos sanitarios** y sitios controlados, cuyas características permiten prevenir su liberación al ambiente y las posibles afectaciones a la salud de la población que labora en estas instalaciones y a los habitantes de los alrededores, de manera global a los ecosistemas.

La norma NOM-083-SEMARNAT-2003, en el punto 4.36 define al relleno sanitario como: *“Obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales”*.

Las principales características de operación de un relleno sanitario bien administrado deben ser:^[11]

- La recolección domiciliaria de los residuos debe ser segura e inspeccionada y los desechos depositados en el relleno sanitario.
- El relleno sanitario y equipos deben ser regularmente monitoreados y contar con el respectivo mantenimiento a las instalaciones y equipos.
- El gas generado en el relleno debe ser captado para evitar emisiones atmosféricas y generar electricidad para proporcionar energía verde.
- Contar con planes de monitoreo que permitan proteger y conservar el ambiente.

- El lixiviado debe ser recolectado y transportado fuera del sitio para darle el tratamiento adecuado dependiendo de sus propiedades, ya sea para recircularlo o para darle algún otro tratamiento, y
- Monitorear el agua subterránea para verificar que se encuentra libre de contaminación y que la membrana o sistema de revestimiento del relleno se encuentra funcionando correctamente.

Para 2008 se estimó que el 67% de los RSU generados en el país, se dispusieron en rellenos sanitarios y sitios controlados y el 33% restante en sitios no controlados, como se puede apreciar en la figura 2-4. Esto representa un incremento importante con respecto a las cifras de finales de los años noventa, según las cuales la disposición en sitios no controlados era cercana al 50%; en este mismo año, Baja California 96%, Nuevo León 98%, Aguascalientes y Distrito Federal 100% dispusieron de casi la totalidad de sus RSU en rellenos sanitarios y sitios controlados, mientras que en las entidades que los dispusieron en menor porcentaje fueron Hidalgo y Chiapas, ambos con cerca de 30% y Oaxaca con 1.5%. Considerando el tipo de localidad, en las zonas metropolitanas más del 80% de los RSU se dispuso en rellenos sanitarios o sitios controlados, mientras que en las localidades rurales y semiurbanas este porcentaje apenas alcanzó el 3.2%.

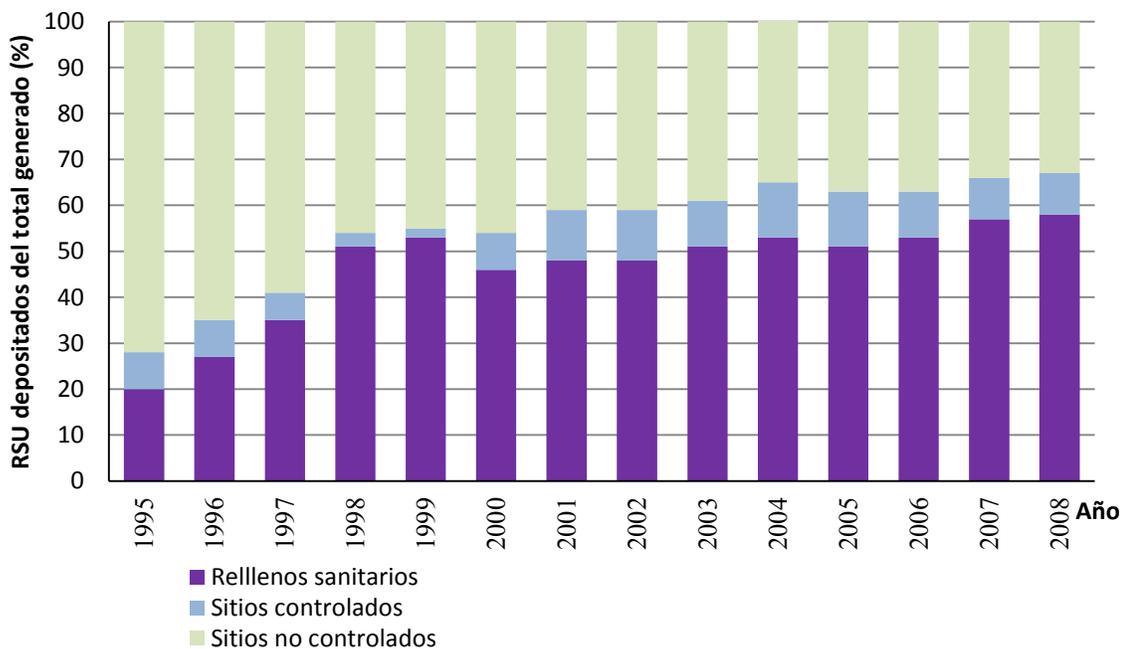


Figura 2-4. Comportamiento de disposición de RSU en México.^[38]

En México la mayoría de los municipios considera al relleno sanitario como la mejor opción para la disposición final de los residuos sólidos urbanos^[32], pero existe aún poco más del 30% de los residuos que son depositados en sitios no controlados, de lo que se deduce que la práctica del relleno sanitario es la técnica más usada para el manejo y disposición final de los RSU en las zonas urbanas y no así en las rurales como se muestra en la figura 2-5.^[38] Desde los datos reportados por el INEGI, se emplea el término “*rellenos de tierra controlados*” pero no se especifica cuáles son las características o diferencia con un relleno sanitario*.

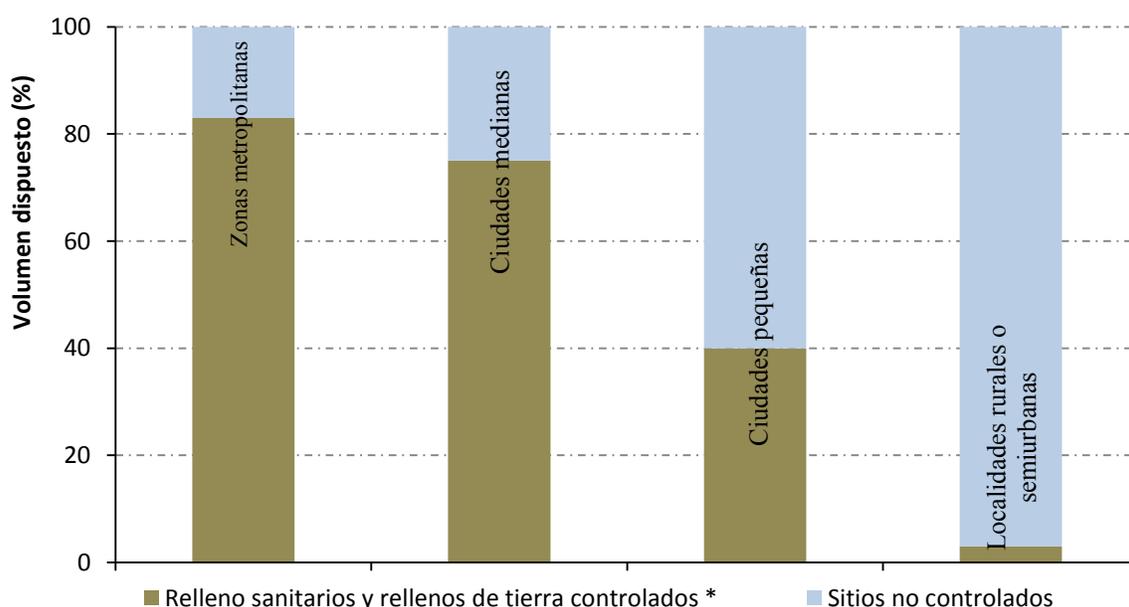


Figura 2-5. Comparativo de disposición final de los RSU en México rellenos sanitarios y sitios no controlados por tipo de localidad en 2008.^[38]

2.4. El lixiviado

2.4.1. Definición de lixiviado

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, el lixiviado es el “*Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y presentar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos*”.^[20]

Los sitios de disposición final son considerados como “reactores muy complejos”^[32], debido a las interacciones físicas, reacciones químicas y/o microbiológicas, por ejemplo: solubilidad o complejación de minerales, ruptura de moléculas complejas en compuestos de bajo peso molecular. Además de constituirse el lixiviado por los materiales que a su paso se van mezclando con numerosos compuestos como metales pesados, compuestos orgánicos y sustancias nitrogenadas; el volumen y composición varían según la estación climatológica del año.

2.4.2. Características del lixiviado

La descomposición y degradación de la materia que constituye los residuos sólidos dentro de un relleno sanitario da origen a compuestos, que manejados de manera inadecuada pueden contaminar y ser un riesgo al ambiente, en consecuencia a la salud. Se puede clasificar de manera global en dos fases: líquida y gaseosa, en las que se concentran los productos de la descomposición, siendo el lixiviado la mezcla líquida y el biogás la fase volátil; aunque también existen materiales sólidos que se forman, pero estos siguen permaneciendo en el interior del relleno, por lo tanto no son fuente de contaminación externa.

La formación del lixiviado se inicia desde que los RSU son depositados en el sitio de disposición final, debido a la humedad contenida en los desechos y a la composición de los mismos. De manera puntual, los constituyentes orgánicos suelen ser los desechos de alimentos, poda y papel entre otros. De acuerdo a datos de la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU), el porcentaje de material orgánico es de aproximadamente de 55%.

La generación de lixiviado en un relleno sanitario es un problema muy complejo, es el resultado de la percolación del agua de lluvia a través de las capas que conforman el relleno, que al mezclarse con el líquido que se genera inicialmente por la compresión por su propio peso y la mecánica al ser compactados con maquinaria para su cubierta. Este líquido es contaminado con compuestos orgánicos e inorgánicos debido a sus diferentes propiedades físicas y químicas, estos materiales pueden ser degradados por procesos fisicoquímicos o bioquímicos, además es muy difícil establecer características generales y por lo tanto,

establecer sistemas de tratamiento estandarizados que puedan emplearse bajo cualquier circunstancia^[6].

En el lixiviado se pueden tener iones amonio, compuestos orgánicos^[14] e inorgánicos, dependiendo del nivel de degradación de los desechos, que pueden estar contenidos en forma disuelta o en suspensión; por su heterogénea y complicada composición, la materia suspendida y disuelta puede formar un líquido cuyo tratamiento es complejo debido a que no existen dosificaciones determinadas de reactivos o la combinación exacta de ellos, para lo cual se realizan pruebas cualitativas para encontrar una dosis cuantitativa de reactivos y tiempos de reacción, como se muestra en la figura 2-6.



Figura. 2-6. Preparación de muestra de lixiviado para realizar pruebas de dosificación de reactivos en el tratamiento fisicoquímico “Prueba de jarras”.

La degradación de la materia orgánica en el sitio, se lleva a cabo mediante dos procesos biológicos, que son el aerobio y anaerobio. El proceso aerobio inicia desde que son depositados y tapados con el material de cubierta, que básicamente es material limo-arenoso o limo-arcilloso tipo tepetate en proporción 50:50, comúnmente denominado tepetate, que en las proporciones correctas sirve como barrera impermeable. El periodo de la reacción aerobia

prevalece hasta agotarse el oxígeno. La reacción anaerobia inicia cuando la presencia de oxígeno es casi nula o sea en un medio anóxico, con lo que empieza el proceso de generación de metano o actividad de metanogénesis. La materia orgánica depositada se puede clasificar en:^[36]

- Materia orgánica depositada en un Relleno Sanitario
- Materiales que se descomponen rápidamente, 3 a 5 años.
 - Materiales que se descomponen lentamente, hasta 50 años o más.

Tabla 2-2. Transformación de los residuos sólidos en biogás y el aporte al lixiviado dentro de un relleno sanitario, adaptado de Kiss *et al.*^[15]

R e s i d u o s s ó l i d o s + H ₂ O		
<u>Compuestos inorgánicos</u>	<u>Compuestos orgánicos</u>	
	Descomposición y biodegradación	
	Con oxígeno (fase aerobia)	Sin oxígeno (fase anaerobia).
Reacciones de disolución, hidrólisis	Reacciones de oxidación, nitrificación	Reacciones de reducción, desnitrificación
Fe, Cu, Ni, Ca, Cr, etc. + NH ₄ OH (iones, cationes y materiales disueltos)	CO ₂ + NO ₂ + H ₂ O + calor (50 a 70°C) + compuestos orgánicos volátiles y solubles	CH ₄ + CO ₂ + NH ₃ + H ₂ S + compuestos orgánicos volátiles y solubles
↓	↓	↓
Fase líquida (Sales disueltas + Compuestos orgánicos solubles)	Fase gaseosa (gases + compuesto evaporados)	Fase líquida (Compuestos orgánicos solubles)
L I X I V I A D O	B I O G Á S	LIXIVIADO

2.4.3. Generación de lixiviados en el rellenos sanitarios

Para describir la generación del lixiviado, el proceso de degradación en un relleno sanitario, se deben considerar los periodos por los que pasan los RSU en función del tiempo que se llevan a cabo en diversas fases, que se generalizan en 5 etapas sucesivas, como se muestra en las figuras 2-7 y 2-8; en todo este periodo se desarrollan diversas fases principalmente en la etapa anaerobia debido al corto tiempo en el que se presenta la fase aerobia.

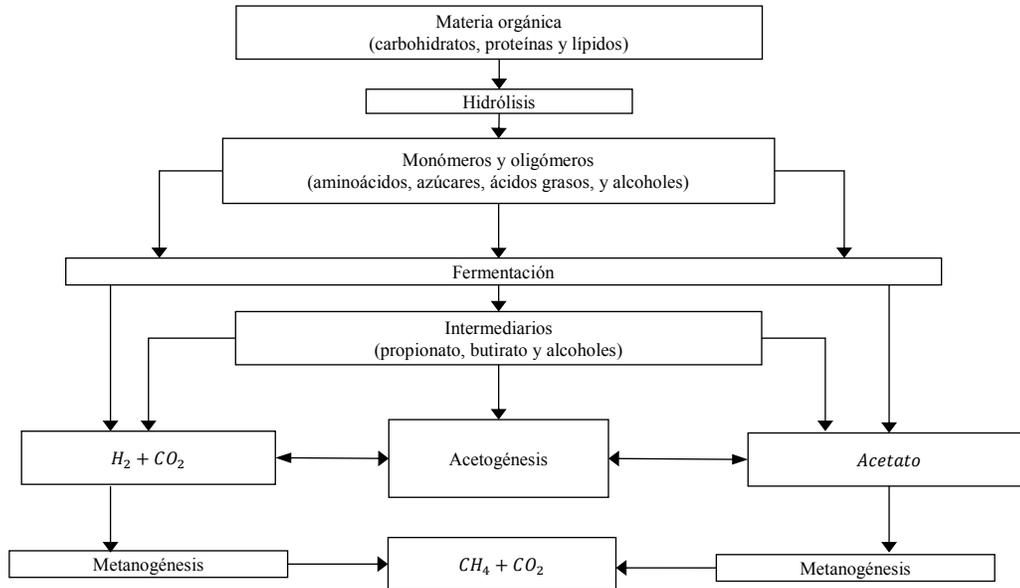


Figura 2-7. Diagrama de la etapa anaerobia de reacción de la materia orgánica en un relleno sanitario.

La fracción de tiempo en el que las fases existen depende del contenido de humedad de los RSU, la infiltración del agua de lluvia a través del relleno, la densidad de compactación inicial y la disponibilidad de nutrientes.^[32]

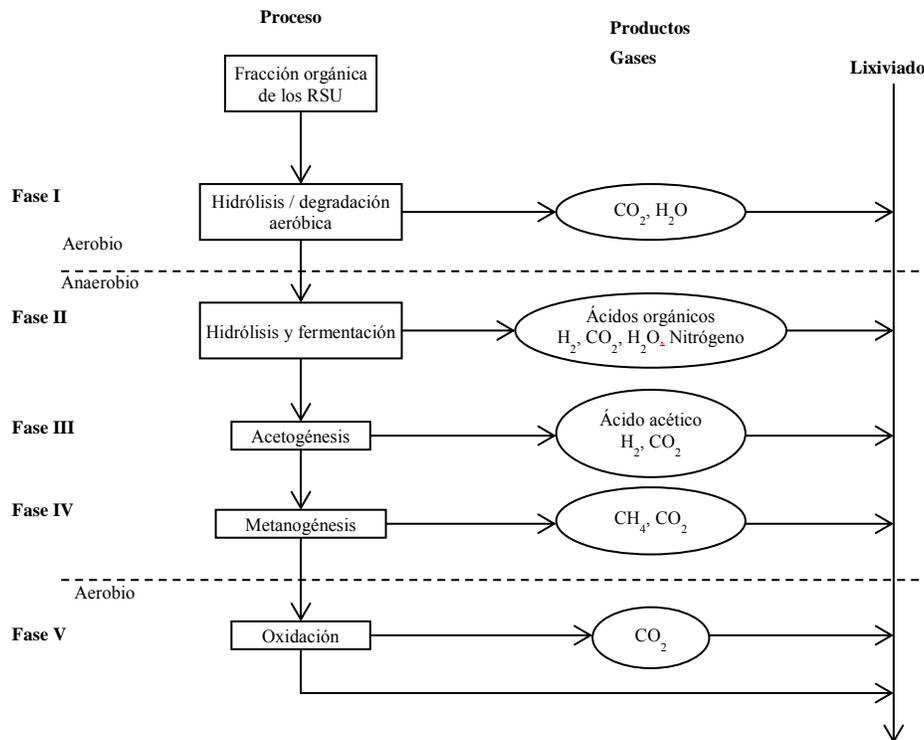


Figura 2-8. Aporte en cada una de las fases de reacción al biogás y lixiviado.

La predicción de las propiedades fisicoquímicas en la generación de lixiviado, debido a la degradación de la materia orgánica como consecuencia de la cantidad y el tamaño, tienden a disminuir en función del tiempo, así también los cambios biológicos afectan a la materia orgánica y las reacciones de solubilidad, hidrólisis, absorción, complejación, oxidoreducción, neutralización y la transferencia de masa y calor se pueden llevar a cabo de manera simultánea, lo cual complica el estudio y predicción de reacciones.^[32]

Las reacciones de biodegradación son de oxido-reducción, cuando el sustrato o donador de oxígeno es oxidado y pierde protones (H⁺) y electrones (e⁻) que son transferidos a un receptor. Según la naturaleza del receptor final, se pueden tener tres tipos de metabolismo energético:

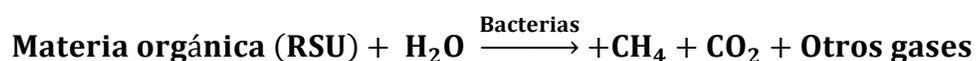
- a: La respiración aerobia, si el receptor final es el oxígeno molecular.
- b: La respiración anaerobia, si el receptor es un compuesto inorgánico diferente al oxígeno: nitratos, sulfatos y carbonatos, entre otros.
- c: La fermentación, si el receptor es un compuesto orgánico. La fermentación se lleva a cabo bajo condiciones de anaerobiosis y puede dar como resultado diferentes compuestos como etanol y ácido láctico, principalmente.^[32]

En la tabla 2-3 se muestra un resumen del intercambio de electrones en algunas reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en dentro del relleno sanitario.

Tabla 2-3. Recepción típica de electrones en reacciones bacterianas.^[36]

Ambiente	Receptor de electrones	Proceso
Aerobio	Oxígeno, O ₂	Metabolismo aerobio
Anaerobio	Nitrato, NO ₃ ⁻	Desnitrificación
	Sulfato, SO ₄ ²⁻	Reducción de sulfato
	Bioxido de carbono, CO ₂	Metanogénesis

La reacción química que esboza de manera general la degradación de los residuos es la siguiente.



Esta ecuación agrupa a todas las etapas por las que atraviesan las cinco fases que corresponde a cada una las reacciones, principalmente a las bioquímicas en condiciones anaerobias, el comportamiento se muestra en la figura 2.9.

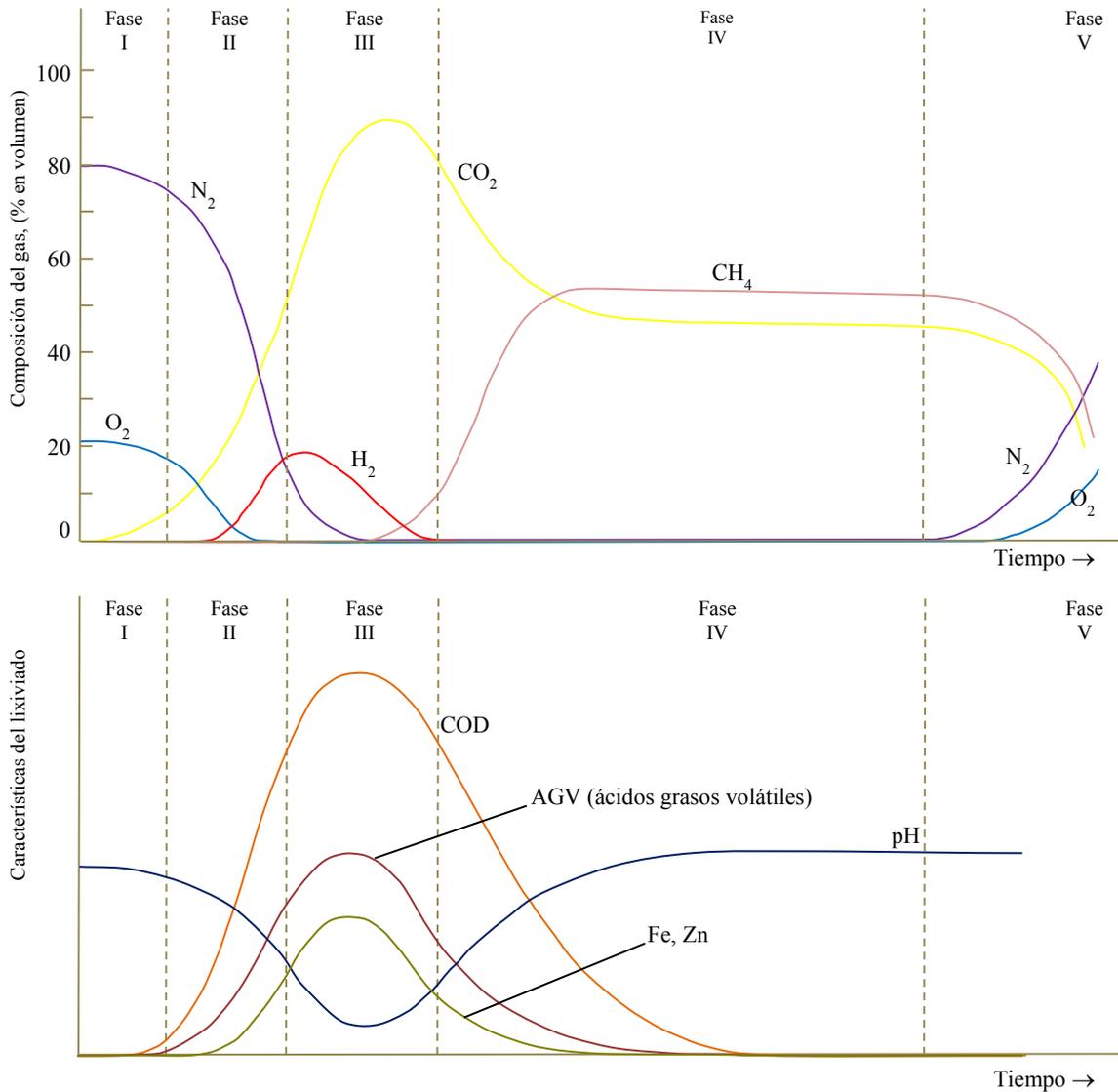


Figura 2-9. Fases de generación de biogás y características de lixiviado en un relleno sanitario.^[36]

Fase I.- fase inicial, primeros días de colocados los RSU en el relleno, las condiciones de descomposición biológica de los RSU son meramente aerobias, por las cantidades de oxígeno que se atraparón en el proceso de cubierta y el contenido en los componentes orgánico biodegradables.

Fase II.- fase de transición, en este período de tiempo inicia el descenso de oxígeno y se empiezan a presentar condiciones anaeróbicas de degradación. El pH del lixiviado comienza a decrecer debido a la presencia de ácidos orgánicos y a la concentración del CO_2 que se incrementa.

Fase III.- fase ácida, se incrementa la actividad microbiana que se inicio en la fase II con cantidades importantes de ácidos orgánicos y trazas de gas hidrógeno, se lleva acabo la transformación: Paso 1.- Hidrólisis de compuestos de alto peso molecular como: lípidos, polisacaridos, proteínas y ácidos nucleicos. Paso 2.- acidogénesis, conversión microbiana de las moléculas generadas en el paso 1 en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como el ácido acético y concentraciones pequeñas de ácido fulvico y otros ácidos complejos, el bióxido de carbono es el principal gas que se genera en esta fase, el pH del lixiviado que se llega a formar es de 5 ó menos. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y la demanda química de oxígeno (DQO) del lixiviado al igual que la conductividad se incrementan de manera considerable debido a la disolución de los ácidos orgánicos, tambien se solubilizan sales de metales pesados presentes.

Fase IV.- fase de fermentación del metano, la formación de metano y ácidos se lleva acabo de manera simultanea, la concentración de ácidos es más reducida, el pH, se incrementa y el rango va desde 6.8 a 8.0, las concentraciones de DBO_5 , DQO y la conductividad, reducirán.

Fase V.- fase de maduración, se presenta despues de que el material orgánico biodegradable se convirtio en CH_4 y CO_2 , producidos en la fase anterior, mientras la humedad siga atravesando el relleno y los sustratos que quedan son de degradación lenta. En esta fase la generación del biogás disminuye, por que gran cantidad de compuestos han migrado al lixiviado, en la figura 2-10 se puede apreciar parte de este comportamiento. Estarán presentes en el lixiviado los ácidos húmicos y fúlvicos, que dificilmente se pueden remover por metodos biológicos y fisicoquímicos.

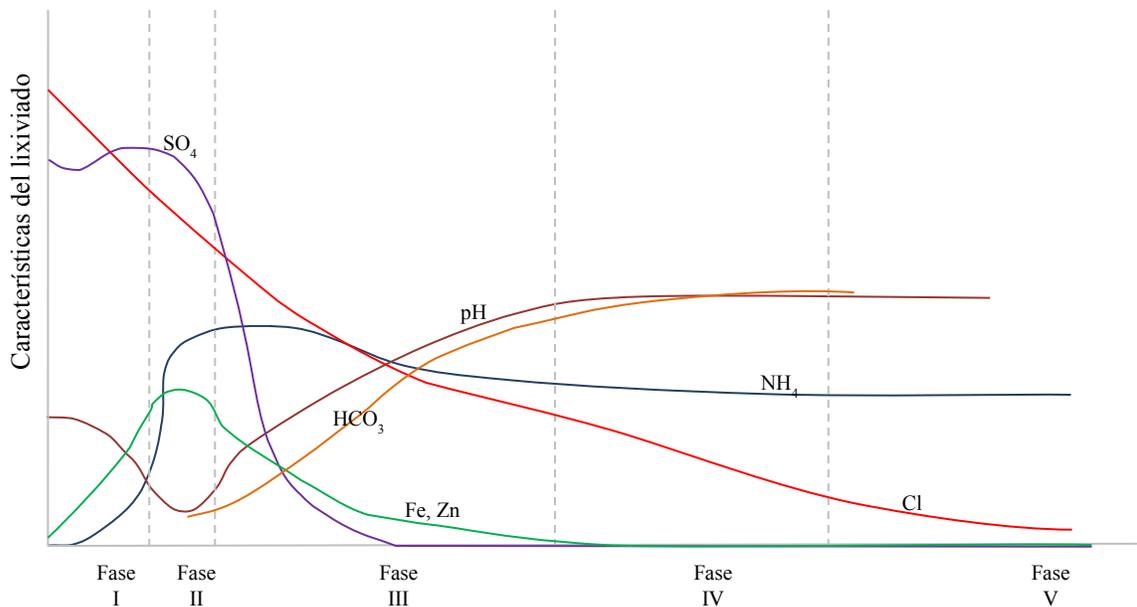


Figura 2-10. Migración de sustancias al lixiviado en relación a las fases (edad) en que se encuentra en un relleno sanitario.^[13]

Las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fulvicos), son complejas agrupaciones macromoleculares que se caracterizan por no presentar propiedades físicas y químicas específicas, tales como una composición elemental definida, un punto de fusión o ebullición concreto, entre otros aspectos. Son de color oscuro, con carga negativa, de carácter ácido, predominantemente aromáticas de carácter fenólico procedentes de la descomposición de la materia orgánica y compuestos nitrogenados, hidrofílas, químicamente complejas y de elevado peso molecular tanto cíclicos como alifáticos sintetizados por ciertos microorganismos presentes en suelo.

Es importante destacar que no existen límites definidos entre los ácidos húmicos, fúlvicos y las huminas. Todos ellos son parte de un sistema supramolecular extremadamente heterogéneo y las diferencias entre estas subdivisiones son debidas a variaciones en la acidez, grado de hidrofobicidad (contenido de restos aromáticos y alquílicos de cadena larga) y la autoasociación de moléculas por efectos del azar.

Cabe aclarar que en el Relleno Sanitario Bordo Poniente se han realizado perforaciones y excavaciones, que comunmente se denominan “calas”, donde se han encontrado materiales degradables en condiciones similares a cuando fueron depositados.

De manera global, el comportamiento de degradación de los materiales orgánicos, en función de la demanda química y bioquímica de oxígeno se puede clasificar en dos etapas, de acuerdo con Johannessen^[13], como se muestra a continuación (tabla 2-4).

Tabla 2-4. Características de lixiviado en un relleno sanitario, fragmento Johannessen.^[13]

Parámetro	Unidad	Etapas ácida (6 meses a 2 años)	Etapas metanogénica (2 a 100 años o más)
pH	--	5 – 6.5	7.5 – 9
DQO	mg/L	20,000 – 30,000	1,500 – 2,000
DBO ₅	mg/L	10,000 – 25,000	500 – 1,000

2.4.4. Composición típica del lixiviado

Una forma típica de clasificar al lixiviado puede ser en función a su edad como se muestra en la tabla 2-5, aunque también existe la forma de clasificarlo según la etapa ya sea ácida o metanogénica, como se muestra en la tabla 2-4, así también se puede establecer, de manera esquemática, un comparativo con aguas residuales y aguas subterráneas (tabla 2-6); así como entre lixiviados de diversos países (tabla 2-7 y 2-8), lo que permite ver la tendencia o el comportamiento y rango de valores en sus componentes.

Tabla 2-5. Características de lixiviado según su edad en un relleno sanitario, fragmento Bhalla *et al.*^[2]

Parámetro	Joven	Intermedio	Viejo
Edad (años)	< 5	5 – 10	> 10
pH	6.5	6.5 – 7.5	> 7.5
DQO (mg/L)	> 10,000	4,000 – 10,000	< 4,000
DBO ₅ /DQO	> 0.3	0.1 – 0.3	< 0.1
Compuestos orgánicos	80% ácidos grasos volátiles (AGV)	5 - 30% AGV + ácidos húmicos y fúlvicos	ácidos húmicos y fúlvicos
Metales pesados	Bajo – medio	Bajo	Bajo
Biodegradabilidad	Importante	Media	Baja

Tabla 2-6. Comparativo de concentraciones típicas entre el lixiviado de un relleno sanitario con agua y agua subterránea según Bhalla y colaboradores.^[2]

Parámetro (mg/L)	Concentración en lixiviado joven	Concentración en lixiviado viejo	Concentración típica de aguas residuales	Concentración típica las aguas subterráneas
DQO	20,000 – 40,000	500 – 3,000	350	20
DBO ₅	10,000 – 20,000	50 – 100	250	0
COT	9,000 – 25,000	100 – 1,000	100	5
Ácidos grasos volátiles	9,000 – 25,000	50 – 100	50	0

Tabla 2-7. Análisis de lixiviado en Noruega y el noroeste de Estados Unidos de Norte América.^[34]

Parámetro	Unidad	Relleno sanitario							
		Noruega						Estados Unidos	
		Grønmo	Brånåsdaalen	Yggeseth	Isi I	Isi II	Taranrød	Cedar Hills	Kent Highland
DQO	mg O ₂ /L	470	1,080	9,425	825	110	3,455	38,800	3,800
DBO total	mg O ₂ /L	320	870	5,250	590	50	2,300	24,500	2,460
COT	mg C/L	100	250	1,700	180	30	800		
N – total	mg N/L	182	254	250	155	166	156	630	56
N - NH ₄	mg N/L	120	225	227	141	102	84		
N - NH ₃	mg N/L	0.04	0.01	0.04	0.02	0.79	0.68		
N – orgánico	mg N/L	62	29	23	14	6	71		
P total	mg P/L	0.6	1.7	7.7	3.3	0.1	1.6	11.3	5.9
Sol. Susp.	mg /L	140	397	466	270	68	1,079	310	220
Sol. Susp. Vol.	mg /L	85	98	182	229	11	602	170	90
Sol. Totales	mg /L	760	1,005	2,180	890	145	1,670		

Tabla 2-8. Caracterización de lixiviado para diferentes países por Martin Carville y Howard Robinson.^[3]

Determinación	Unidad	Hong Kong	Sudeste de Asia	Sudáfrica	Reino Unido
pH	–	7.4–8.6	6.0–8.4	7.5–8.3	7.4–8.5
DQO	mg/L	650–2,800	1,600–13,000	1,400–6,000	2,600–8,500
DBO ₅	mg/L	45–400	–	300–700	90–3,000
Carbón orgánico total (COT)	mg/L	–	400–10,000	–	400–3,400
Cloruros	mg/L	500–3,000	2,500–6,300	1,200–4,000	1,700–5,200
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/L	3,000–12,000	8,000–40,000	3,000–12,000	7,000–17,000
Conductividad	µS/cm	14,000–30,000	14,000–42,000	10,000–30,000	14,000– 30,000
N-Amoniacal	mg/L	1,200–3,000	1,200–3,000	900–3,000	1,100–2,500
N-Nitratos	mg/L	< 0.1–22	< 1–12	< 0.1–1.3	< 0.3–2
N-Nitritos	mg/L	< 0.1–3.6	< 1–< 2	< 0.1–1.4	< 0.1–2
Sulfatos (como SO ₄)	mg/L	–	< 5–1200	< 0.6–400	< 5–150
Fosfatos (como P)	mg/L	3–125	2–50	1–25	4–20
Sodio	mg/L	200–2,100	1,500–3,000	800–2,500	1,700–4,000
Magnesio	mg/L	18–50	60–500	75–400	17–150
Potasio	mg/L	375–1,200	1,000–3,000	550–1,600	750–1,700
Calcio	mg/L	20–45	50–3,000	50–200	40–420
Cromo	µg/L	–	200–2,500	80–300	40–2,200
Manganeso	µg/L	–	250–17,500	12–900	70–2,200
Hierro	µg/L	5,000–9,000	1,000–20,000	2,500–20,000	3,000–72,000
Níquel	µg/L	–	400–1,500	80–120	150–3,000
Cobre	µg/L	–	< 50–400	< 50	20–80
Zinc	µg/L	200–2,200	150–1,500	30–200	30–330
Cadmio	µg/L	–	< 50	< 1–< 10	< 10–20
Plomo	µg/L	–	< 300–< 1,000	< 4–56	< 40–600
Arsénico	µg/L	–	–	7.5–62	2–24
Mercurio	µg/L	–	–	< 50	< 0.1

2.5. Reglamentación relativa al lixiviado

El marco normativo en materia de protección ambiental inicia desde la Constitución Política^[5] como pilar de los derechos constitucionales para salvaguardar, “*Conservar y mejorar el hábitat y preservar la integridad de sus tierras*”, seguidamente en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, reglamenta las disposiciones establecidas en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, referente a las disposiciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en la cual se sustenta el origen de las Normas Oficiales Mexicanas que marcan de manera obligatoria los lineamientos a seguir.

Cabe aclarar que en relación al tema de lixiviados se encuentra la NOM-083-SEMARNAT-2003, la cual toman como apoyo a las NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, para cumplir con los lineamientos de manera que el lixiviado sea tratado y descargado a un bien nacional o para su reúso, de acuerdo a los parámetros que estas exigen, considerándose ya como una agua tratada.

Las Normas Mexicanas (NMX), son de referencia de calidad y aplicación voluntaria pero se recomienda su atención para normalizar o estandarizar los criterios de evaluación, en el caso de lixiviados no existen normas como tal, mas sin embargo se emplean las relativas a aguas.

Cabe mencionar que de manera local, en la Ciudad de México, se cuenta con diversos lineamientos, como la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, el Reglamento de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, así como la Ley de Protección a la Tierra en el Distrito Federal, los cuales no hacen referencia al lixiviado que se genera en los rellenos sanitarios.

A continuación se realiza un extracto de la normatividad mexicana relativa a la preservación del medio ambiente referente a los desechos sólidos y lixiviados generados en un relleno sanitario en México.

2.5.1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

Artículo 4º. *“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley”.*

“Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines”.

Artículo 27, dice *“La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales... cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana... mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico...”;*

Artículo 115. *“Los estados adoptarán, para su régimen interior, la forma de gobierno republicano, representativo, democrático, laico y popular, teniendo como base de su división territorial y de su organización política y administrativa, el municipio libre, conforme a las bases siguientes:”*

III. Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes:

- a) Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales;*
- c) Limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos;*

2.5.2. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

Artículo 1º.- *La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:*

I.- *Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar;*

III.- *La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;*

Artículo 3º.- *Para los efectos de esta Ley se entiende por:*

III.- *Aprovechamiento sustentable: La utilización de los recursos naturales en forma que se respete la integridad funcional y las capacidades de carga de los ecosistemas de los que forman.*

XXXII.- *Residuo: Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó;*

Artículo 7º.- *Corresponden a los Estados, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:*

VI.- *La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley;*

Artículo 120.- *Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local:*

VI. *Las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos; y*

VII.- *El vertimiento de residuos sólidos, materiales peligrosos y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, en cuerpos y corrientes de agua.*

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 134.- *Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:*

I. *Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;*

II. *Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;*

III.- *Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes;*

Artículo 135.- *Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:*

I. *La ordenación y regulación del desarrollo urbano;*

II. *La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;*

III.- *La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen.*

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:*

I. *La contaminación del suelo;*

II. *Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;*

Artículo 137.- *Queda sujeto a la autorización de los Municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales. La Secretaría expedirá las normas a que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos municipales.*

Artículo 138.- *La Secretaría promoverá la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para:*

I. *La implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales; y*

II. *La identificación de alternativas de reutilización y disposición final de residuos sólidos municipales, incluyendo la elaboración de inventarios de los mismos y sus fuentes generadoras.*

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.*

Artículo 140. *La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Economía.*

2.5.3. Normas Oficiales Mexicanas

NOM-001-SEMARNAT-1996,^[20] establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Estableciendo el conjunto de parámetros físicos, químicos, biológicos y los niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual, con el fin de preservar y controlar la calidad de las aguas conforme a la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno₅, nitrógeno total, fósforo total, temperatura y pH, entre otras consideraciones.

NOM-002-ECOL-1996,^[25] Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.

Tabla 2-9. Límites máximos permisibles de aguas (fragmento NOM-002-SEMARNAT-1996).

Límites máximos permisibles			
Parámetros	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y Aceites (mg/L)	50	75	100
Sólidos sedimentables (mg/L)	5	0.75	10

El rango permisible de pH (potencial hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 10 y 5.5 unidades, determinado para cada una de las muestras simples. Las unidades de pH no deberán estar fuera del intervalo permisible, en ninguna de las muestras simples.

Los límites máximos permisibles para los parámetros demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales, que debe cumplir el responsable de la descarga a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, son los establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.

NOM-003-SEMARNAT-1997,^[26] Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, es de carácter obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso, ver tabla 2-10.

Tabla 2-10. Límites máximos permisibles de agua según la NOM-001-ECOL-1996.

Tipo de reúso	Promedio mensual				
	Coliformes fecales NMP/100 mL	Huevos de helminto (h/L)	Grasas y aceites (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
Servicios al Público con Contacto directo	240	≤ 1	15	20	20
Ser. al Público Contacto Indirecto u ocasional	1,000	≤ 5	15	30	30

El agua residual tratada reusada en servicios al público no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.

NOM-083-SEMARNAT-2003, esta norma establece las especificaciones de selección del sitio, el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, se establece que se debe elaborar un programa de monitoreo del lixiviado, que tenga como objetivo conocer sus características de Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y metales pesados; elaborar un programa de monitoreo por un periodo de al menos 20 años, este periodo puede ser reducido si se demuestra que ya no existe riesgo para la salud y el ambiente.

2.6. Lineamientos de España y Estados Unidos de Norte América, referente al monitoreo de lixiviados

Debido a que en la normatividad mexicana no se encuentra definida la frecuencia de monitoreo, a continuación se muestra un extracto de la reglamentación de España con base a los lineamientos de la Comunidad Europea y de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norte América.

2.6.1. Ministerio de Medio Ambiente Español

1697 REAL DECRETO 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.^[17]

ANEXO III del Real Decreto 1481/2001

Procedimientos de control y vigilancia en las fases de explotación y de mantenimiento posterior

3. Datos de emisión: control de aguas, lixiviados y gases

Deberán recogerse muestras de lixiviados y aguas superficiales, si las hay, en puntos representativos. Las tomas de muestras y medición (volumen y composición) del lixiviado deberán realizarse por separado en cada punto en que se descargue el lixiviado de la instalación, según Norma UNE-EN 25667:1995, sobre «Calidad del agua. Muestreo. Parte 2: guía para las técnicas de muestreo (ISO 5667-2:1991)»...

La frecuencia de la toma de muestras y análisis figura en el cuadro que se ofrece a continuación. Para el control de los lixiviados y el agua, deberá tomarse una muestra representativa de la composición media.

Tabla 2-11. Frecuencia de monitoreo de acuerdo a la normatividad de España.

<i>Característica:</i>	<i>Fase de explotación</i>	<i>Fase de mantenimiento posterior (1)</i>
<i>Volumen de los lixiviados.</i>	<i>Mensualmente (3) y (4).</i>	<i>Cada seis meses.</i>
<i>Composición de los lixiviados (2).</i>	<i>Trimestralmente (3)</i>	<i>Cada seis meses.</i>
<i>Volumen y composición de las aguas superficiales (7).</i>	<i>Trimestralmente (3) y (4).</i>	<i>Cada seis meses.</i>
<i>Emisiones potenciales de gas y presión atmosférica (CH₄, CO₂, O₂, H₂S, H₂, etc.) (4).</i>	<i>Mensualmente (3) y (5)</i>	<i>Cada seis meses (6).</i>

(1) La frecuencia de la toma de muestras podría adaptarse en función de la morfología de los residuos del vertedero (en túmulo, enterrado, etc.).

(2) Los parámetros que deban medirse y las sustancias que deban analizarse variarán conforme a la composición de los residuos depositados; deberán indicarse en el documento de autorización y reflejar las características del lixiviado de los residuos.

(3) Si la evaluación de los datos indica que mayores intervalos son igualmente efectivos, los mismos podrán adaptarse. Para los lixiviados, siempre se deberá medir la conductividad como mínimo una vez al año.

(4) Estas mediciones se refieren principalmente al contenido de materia orgánica en el residuo.

(5) CH₄, CO₂, O₂ periódicamente; otros gases, según proceda, conforme a la composición de los residuos depositados para reflejar sus propiedades de lixivabilidad.

(6) Deberá comprobarse periódicamente la eficacia del sistema de extracción de gases.

(7) Sobre la base de las características del emplazamiento del vertedero, las Comunidades Autónomas podrán determinar que dichas mediciones no son necesarias, e informarán de ello al Ministerio de Medio Ambiente.”

2.6.2. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norte América (US EPA)

En el documento, *Environment Agency Guidance on Monitoring of Landfill Leachate, Groundwater and Surface Water, (Draft v. 3), June 2002 Draft for Public Consultation*, en el apartado 3.6 Programas de Monitoreo, tiene cinco categorías:

- *Caracterización inicial de monitoreo de agua subterránea y agua superficial;*
- *Rutina de monitoreo de agua subterránea y agua superficial;*
- *Monitoreo y caracterización del lixiviado;*
- *Evaluación del monitoreo (incluyendo los niveles de control y de intervención para las aguas subterráneas);*
- *Conclusión del monitoreo (Agencia de Medio Ambiente, 2000c);*

En el punto 6.4 Especificaciones y frecuencia de monitoreo se describe que:

Se debe generar una serie de datos para cada plan de manejo donde se defina la frecuencia de los parámetros y mediciones de control a realizar. Al finalizar el periodo de monitoreo para cualquier sitio, realizar un comparativo entre el número de puntos de monitoreo y la frecuencia para obtener la información suficiente para garantizar el cumplimiento.

Esto sólo puede ser evaluado en relación con los requisitos mínimos de la reglamentación sobre rellenos sanitarios, las condiciones específicas del sitio y la condición del relleno. Los requisitos mínimos de la normativa sobre rellenos sanitarios referente al monitoreo, se muestra en la Tabla 2-12.

Tabla 2-12. Frecuencia mínima de control exigidos por el Reglamento de Rellenos Sanitarios⁽⁹⁾[10]

Parámetro	Fase en operación	Fase mantenimiento posterior ⁽³⁾
Volumen del lixiviado	Mensual ^{(1), (3)}	Cada seis meses
Composición del lixiviado ^{(2) (5)}	Cada tres meses ⁽³⁾	Cada seis meses
Volumen y composición del agua superficial ⁽⁴⁾	Cada tres meses ⁽³⁾	Cada seis meses
Nivel del agua subterránea	Cada seis meses ⁽⁶⁾	Cada seis meses ⁽⁶⁾
Composición agua subterránea	Frecuencia específica del sitio ⁽⁷⁾⁽⁸⁾	Frecuencia específica del sitio ⁽⁷⁾⁽⁸⁾

Notas:

1. La frecuencia de muestreo puede ser adaptada de acuerdo a la composición de los residuos del relleno (en montículo, cubierta etc.). Esto tiene que ser especificado en el permiso.
2. Los parámetros que deben medirse y las sustancias que deben analizarse varían de acuerdo a la composición de los residuos depositados. Deben especificarse en las condiciones de la autorización de un relleno para que se muestren las características de lixiviación de los residuos.
3. Intervalos más largos pueden ser permitidos si la evaluación de los datos (revisión basado en el riesgo) indica que serían igualmente efectivos. Para los lixiviados, la conductividad siempre se debe medir por lo menos una vez al año.
4. De acuerdo al historial de las características del relleno, mediante la revisión de seguimiento basándose en el riesgo, la Agencia podrá determinar que no se requieren estas mediciones.
5. Estos no aplicará cuando no se requiere la recolección de lixiviados.
6. Si existen fluctuaciones en los niveles de agua subterránea, la frecuencia debe ser aumentada.

7. La frecuencia se debe basar en la posibilidad de que las medidas correctoras entre dos muestras si se alcanza un nivel de control y/o el nivel de activación, es decir, la frecuencia debe ser determinado sobre la base del conocimiento y la evaluación de la velocidad de flujo del agua subterránea (la evaluación del riesgo hidrogeológico y/o la revisión de seguimiento basado en el riesgo).

8. Cuando se alcanza un nivel de alerta, es necesario repetir la toma de muestra como verificación (como se establece en el plan de acción de contingencia). Cuando se ha confirmado el nivel se debe seguir, el plan de acción de contingencia establecido en las condiciones del permiso.

9. Las muestras de lixiviado deberán ser tomadas en puntos representativos. Toma de muestras y medición (volumen y composición) del lixiviado deberán realizarse en cada punto en que se descargue el lixiviado desde el sitio. Referencia: Directrices Generales sobre Tecnologías de Muestreo ISO 5667-2 (International Standards Organization, 1991).

3. ANTECEDENTES

En la técnica de relleno sanitario se requiere de un diseño básico para la correcta operación, en el que se deben considerar al menos los siguientes cuatro procesos:^[4]

1. Construcción: construcción de instalaciones, caminos y preparación de la superficie.
2. Operación: descarga, empuje, compactación y cubierta diaria.
3. Clausura: colocación de cubierta final, control de la filtración de agua pluvial, control de la migración de biogás y control de lixiviado, reducción de tolvaneras, control de fauna nociva y malos olores.
4. Saneamiento: generación de áreas verdes, reintegración del área al entorno, colocación de barreras forestales.

En las figuras 3-1 a la 3-5, se puede observar parte de la operación del Relleno Sanitario Bordo Poniente (RSBP), en cada una de las cuatro etapas que conforman las diferentes fases de operación. Así como en la figura 3-3 se puede apreciar parte de la barrera forestal y así como en la 3-4 se aprecia parte de la zona arbolada y la operación de riego de caminos para reducir el levantamiento de polvo y como parte final de un relleno sanitario se tiene la cubierta final como se aprecia en las figuras 3-5 y 3-6.



Figura 3-1. Operación del RSBP, recepción y cubierta de los RSU en la Etapa 1.



Figura 3-2. Operación en la Etapa 4, formación del talud, compactación, recepción y cubierta de los RSU.



Figura 3-3. Barrera forestal en la Etapa 3.



Figura 3-4. Riego de caminos para reducir tolvaneras.



Figura 3-5. Vista de la cubierta final en la Etapa 2.



Figura 3-6. Conservación como área verde ya saneada en la Etapa 3.

Durante la operación normal se deben considerar las siguientes actividades como rutinarias, independientemente del método de operación: registro (ingreso), recepción y descarga de los residuos en el frente de trabajo, empuje, compactación y cobertura diaria, adicionalmente se llevan actividades complementarias, entre ellas: preparación de patios para la descarga de los residuos, riego, limpieza, topografía, extracción de lixiviados, construcción de instalaciones del sistema de biogás, sistema de drenaje pluvial y control de fauna nociva. En la figura 3-7 se muestra un ejemplo de la conformación de talud en la Etapa 4 del RSBP.



Figura 3-7. Conformación del talud en la Etapa 4.

El relleno sanitario Bordo Poniente (RSBP) inició su operación en 1985 recibiendo, RSU “*basura*” de las Delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco y del municipio de Texcoco; debido al aumento de los residuos sólidos urbanos, se vio en la necesidad de ampliar las etapas de disposición final, construyéndose hasta la cuarta etapa, para poder recibir desechos de todas las Delegaciones del Distrito Federal, en la figura 3-8 se muestra el transporte hacia el frente de trabajo en la etapa 4. Siendo el único relleno que operó con el cierre de los sitios de disposición final: Prados de la Montaña y Santa Catarina, cerrados en julio de 1994 y en el año 2000 respectivamente. En Bordo Poniente se cerró la operación de la 4ª Etapa en diciembre de 2011, para el año de 2008 en esta etapa se recibieron en promedio 12,600 ton/día, llegando en ocasiones hasta 13,401 ton/día.^[31] en la figura 3-8, se puede apreciar la generación de los residuos sólidos que se generan en promedio por día en cada una de las delegaciones, dando un total de 12,816 toneladas al día, más 585 toneladas generadas en la central de abastos.



Figura 3-8. Generación de residuos sólidos por delegación en toneladas.

En la tabla 3-1 se muestra el área que ocupa cada una de las cuatro etapas que conforman el RSBP, así como el periodo en que estuvieron en operación y la cantidad de desechos sólidos que se depositó en ellas. Cabe mencionar que desde el año de 1992 la disposición final de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México se realiza bajo la técnica de relleno sanitario.^[9]

Tabla 3-1. Superficie que ocupa el Relleno Sanitario Bordo Poniente en cada una de sus cuatro etapas y el periodo en el que operó cada una*.

Etapa	Superficie total (Ha)	Superficie efectiva de operación, área de disposición (Ha)	Cantidad de residuos recibidos en toda su vida útil (toneladas X 10 ⁶)	Periodo de operación
1 ^a	75	63.58	3.80	Feb. 1985 – jul. 1988 Feb. 1991 – jun. 1992
2 ^a	80	64.10	3.40	Jul. 1988 – jul. 1991 Feb. 1993 – jun. 1994
3 ^a	104	102.66	6.90	Ago. 1991 – nov. 1994
4 ^a	412	351.33	68.78	Nov. 1994 – dic. 2011

*Datos proporcionados por DGSU/DTDF/SODF/JUDSDF.



Figura 3-9. Transporte de Residuos dentro de la Etapa 4.

El desplante del RSBP, fue sobre una estructura geológica, constituida por una secuencia de depósitos lacustres (correspondientes al antiguo lago de Texcoco), cuya saturación y características físicas les dan correspondencia con arcillas suaves de alta compresibilidad de aproximadamente 60 m,^[9] con parámetros geohidrológicos de conductividad hidráulica muy baja, del orden hasta de 10^{-9} cm/s, el agua natural del nivel freático y del acuífero superior es de características salinas. Ante tales condiciones, su construcción incluyó la instalación de una geomembrana de polietileno de alta densidad como se muestra en la figura 3-9, la cual se colocó sobre la superficie del terreno natural, para disponer residuos sobre la misma en subsecuentes operaciones los RSU.

En el predio donde se encuentra ubicado el relleno, se presenta un hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones de agua (que también se le puede denominar el fenómeno de subsidencia) en las capas de materiales naturales. Este fenómeno es directamente inducido por la carga que emite el depósito de los residuos y normalmente es difícil medirlo por métodos directos como el sondeo mecánico exploratorio, dado que se pueden presentar riesgos en la integridad de la impermeabilización sintética instalada, además que la información obtenida de esta manera es puntual, lo que implica el uso de correlaciones e interpretaciones.^[4] En la figuras 3-10 y 3-11, se puede observar la forma en que se preparó el terreno para recibir los residuos.



Figura 3-10. Impermeabilización de la celda en la base del relleno (colocación de la geomembrana).



Figura 3-11. Protección de la geomembrana.

En el Relleno Sanitario Bordo Poniente, una fracción del lixiviado que se forma por la reacción (descomposición), arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los RSU es

transportado por camiones cisterna para ser evaporados en una laguna^[1], también es recirculado en la corona del propio relleno, para reincorporar la humedad requerida por los residuos orgánicos. En la figura 3-12 y 3-13, se muestra parte de la infraestructura para reincorporar el lixiviado a las celdas y puedan seguir con las reacciones de descomposición dentro del propio relleno. Es importante destacar que es relativamente difícil determinar el volumen de lixiviado que se genera, así como sus características.^[32]



Figura 3-12. Vista parcial de la instalación de infraestructura para la recirculación de lixiviado.



Figura 3-13. Preparación del sistema de bombeo portátil para la recirculación de lixiviado en la Etapa 2.

Han existido estudios aislados de la calidad y tratabilidad del lixiviado que se genera en el RSBP,^{[30][35][37]} pero a la fecha no se ha realizado un estudio de seguimiento para ver el comportamiento según su edad, pues en un relleno sanitario se pueden clasificar los lixiviados en: *joven* < 2 años, *2* < *medio* < 10 años y *maduro* > 10 años.^[36]

La composición del lixiviado es muy compleja, esta varía según la zona y la época del año, además contiene un gran número de compuestos^[29], debido a que un relleno sanitario actúa como un gran reactor, en el que se pueden presentar diversas reacciones de acuerdo a la naturaleza de los desechos y las condiciones físicas y climatológicas del lugar.

Es importante realizar la caracterización de forma periódica, cabe comentar que en la normatividad mexicana no se establecen tiempos o frecuencia de monitoreo del lixiviado y para analizar el nivel de degradación de los desechos, que pueden estar contenidos en forma disuelta o en suspensión. El lixiviado puede contener compuestos orgánicos e inorgánicos como metales pesados (plomo, mercurio y hierro entre otros). Aunque en el RSBP, los RSU se dispusieron de forma adecuada, es importante el monitoreo permanente de por lo menos 20 años como lo marca la NOM-083-SEMARNAT-2003^[27], tanto al propio relleno y de ser posible a las zonas aledañas.

De acuerdo a Tchobanoglous *et al.* (1998)^[36], la gestión de lixiviado es clave para la eliminación del potencial que tiene un sitio de disposición final para contaminar acuíferos subterráneos. Tchobanoglous *et al.* (1998)^[36], refieren cuatro alternativas para tratar el lixiviado recolectado de los rellenos sanitarios:

- 1) **Recirculación**, como se muestra en la figura 3-12 y 3-13;
- 2) **Evaporación**, Parte de las instalaciones para evaporar el lixiviado, como se puede observar en la figura 3-14;



Figura 3-14. Tinas de evaporación de lixiviados en la Etapa 4.

3) **Tratamiento seguido por evacuación**, de acuerdo a las características fisicoquímicas y biológicas del lixiviado es el tratamiento que se emplea. En las figuras 3-15 a la 3-17, se muestran las plantas que dan tratamiento al lixiviado.

4) **Descarga a los sistemas municipales** para la recolección de aguas residuales, cabe aclarar que en México por ley, no está permitida esta alternativa, a menos de que se cumpla con la normatividad relativa a los niveles máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y tratadas.



Figura 3-15. Planta de tratamiento fisicoquímico de lixiviado en la Etapa 1.



Figura 3-16. Planta de tratamiento fisicoquímico de lixiviado en la Etapa 2.



Figura 3-17. Planta de tratamiento de lixiviado por osmosis inversa en la Etapa 4.

3.1. Ubicación del Relleno Sanitario Bordo Poniente (Área de estudio)

El Distrito Federal, dividido en 16 delegaciones políticas, tiene una superficie de 1,485 km², está ubicado en el centro del país rodeado por el Estado de México y Morelos cerca de Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. Como se aprecia en la figura 3-18.

Es importante mencionar que se realizó un estudio en el cual se observó que parte de la generación de residuos sólidos en la Ciudad de México, provienen de la población flotante de la Zona Metropolitana que ingresa al Distrito Federal, el origen de los residuos depositados en el relleno sanitario provenían de la Ciudad y también un 25% de municipios del Estado de México.^[31]



Figura 3-18. Posición geográfica del Distrito Federal y el Relleno Sanitario Bordo Poniente.

El relleno sanitario Bordo Poniente se encuentra ubicado en la Zona Federal del lago de Texcoco, al oriente del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, colinda al poniente con el Periférico Oriente Río de los Remedios y la colonia Impulsora Avícola, al oriente con el Dren General del Valle de México (canal de la Compañía), al norte con el Río de los Remedios y al sur con el brazo derecho del Río Churubusco. Se localiza en Prolongación Periférico Oriente sin número; en la figura 3-19 se observa la ubicación geográfica, así como las cuatro etapas que constituyen el Relleno Sanitario Bordo Poniente.

Coordenadas geográficas de ubicación del R. S. Bordo Poniente

Longitud: 99°00' 14.51" O y 99° 02' 36.21"

Latitud: 19° 26' 09.36" N y 19° 29' 09.22"



Figura 3-19. Ubicación geográfica del Relleno Sanitario Bordo Poniente y su distribución.

4. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en 3 fases: en **la primera** se realizó un análisis documental para obtener la información pertinente que permita analizar el comportamiento fisicoquímico del lixiviado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente, durante la operación y pos-clausura. **En la segunda fase** se evaluaron y analizaron los resultados fisicoquímicos de pH, DQO, DBO₅, Grasas y aceites, Sólidos totales volátiles y Sólidos totales suspendidos, como parte de la caracterización del lixiviado durante la operación y pos-clausura. Finalmente en **la tercera fase** se determinaron en laboratorio las características fisicoquímicas durante el año 2014 y se evaluó la composición química con la finalidad de conocer el grado de estabilización del lixiviado y para contar con información pertinente que permitiera apreciar posibles impactos ambientales.

4.1. Primera fase: Análisis documental

Se realizó un análisis documental para obtener la información pertinente que permitiera analizar el comportamiento fisicoquímico del lixiviado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente, durante la operación y pos-clausura.

Se consultó el archivo del Área de Monitoreo de la DGSU, para obtener todos los datos referentes a los análisis fisicoquímicos efectuados al lixiviado del RSBP, así como los croquis de los puntos de monitoreo.

Los datos se obtuvieron de los informes impresos de los muestreos (monitoreo) de lixiviado del Relleno Sanitario Bordo Poniente del año 1996 a 2004, así como en archivos electrónicos de los informes del monitoreo de lixiviado del año 2005 a 2014.

De esta consulta documental se desprendió la frecuencia de muestreo y los métodos analíticos empleados por las áreas involucradas en estas actividades, así como los puntos muestreados.

Los muestreos variaron, dependiendo de las actividades de operación y las condiciones climatológicas.

4.1.1. Muestreo y métodos de análisis fisicoquímicos

4.1.1.1. Muestreo

Dentro del tema de los residuos sólidos, es de vital importancia el monitoreo ambiental, el cual permite evaluar los parámetros por medio de la verificación periódica de los requerimientos establecidos (normados o según las necesidades de operación), para el control de impactantes ambientales.

Como se ha mencionado, en la normatividad de México no se tiene establecida la periodicidad de monitoreo, mas sin embargo, para el caso de Bordo Poniente en la fase de operación y pos-clausura, se realizó de manera mensual en cada uno de los puntos, cuidando de no interferir con las maniobras de operación, en algunas ocasiones se cancelaban o posponían cuando los caminos se encontraban intransitables por cuestiones meteorológicas; en la figura 4-1 se puede apreciar parte de las actividades de las brigadas de monitoreo en la toma de muestras para análisis fisicoquímicos.



Figura 4-1. Muestreos de lixiviado y medición de parámetros en campo.

En el relleno sanitario se tiene una red de captación de lixiviado, algunos cárcamos como los que se muestran en las figuras 4-2 y 4-3, son los puntos donde se realizaron algunos de los muestreos por parte del Área de Monitoreo de la Dirección de Transferencia y Disposición Final de la DGSU.



Figura 4-2. Pozo de extracción y monitoreo de lixiviado en la Etapa 1.



Figura 4-3. Pozo de extracción y monitoreo de lixiviado en la Etapa 3.

Los puntos de muestreos se describen en la tablas 4-1 y 4-2, donde se menciona el listado de los puntos que conforman el relleno y en las figuras 4-4 a la 4-7 se ubica cada uno de estos puntos, cabe aclarar que en las etapas 1, 2 y 3 el muestreo correspondió al periodo de 1996 a 2014, cuando estas etapas ya no estaban en operación, pero en la Etapa 4 los muestreos se realizaron cuando se encontraba en plena operación. Los muestreos fueron realizados de acuerdo a los propios métodos, protocolos y puntos de monitoreo de las brigadas del Área de Monitoreo de la Dirección de Transferencia y Disposición Final de la DGSU, en el periodo comprendido para este estudio (1996 a 2014).

Tabla 4-1 Puntos de monitoreo en las etapas 1, 2 y 3 del RSBP.

Puntos de muestreo en el RSBP con sus respectivos símbolos de localización en las figuras 4-4, 4-5 y 4-6					
Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3	
Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
Cárcamo 3	C – 3	Pozo 5B	P.5B	Cárcamo 2	C-2
Cárcamo 6	C – 6	Pozo 13B	P.13B	Cárcamo 3	C-3
Cárcamo 8 (Sureste de la celda)	C – 8	Pozo 18-B	P-18B	Cárcamo 6	C-6
Cárcamo 10	C – 10	Pozo 32B	P-32B	Cárcamo 7	C-7
Cárcamo 12	C – 12	Pozo 35	P-35	Cárcamo 8	C-8
Cárcamo 13 (Norte de la celda)	C – 13	Pozo 35B	P-35B	Cárcamo 10	C-10
Cárcamo 15	C – 15	Punto Norte	P. NORTE	Cárcamo 13	C-13
Cárcamo 17 (Noroeste de la celda)	C – 17	Noroeste de la celda	NW DE LA CELDA	Cárcamo 14	C-14
		Oeste de la celda	W DE LA CELDA	Cárcamo 15	C-15
		Suroeste de la celda	SW DE LA CELDA	Cárcamo 16	C-16
		Punto Sur	S DE LA CELDA	Cárcamo 18	C-18
		Sureste de la celda	SE DE LA CELDA	Cárcamo Oeste	C-Oeste
		Este de la celda	E DE LA CELDA		
		Noreste de la celda	NE DE LA CELDA		

Tabla 4-2 Puntos de monitoreo en la etapa 4 del RSBP.

Puntos de muestreo en la Etapa 4 del RSBP con sus respectivos símbolos de localización en la figura 4-7								
1996		1997		1999	2000		2001 - 2014	
Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre	Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
Punto 1	P(1)	Punto 1	P(1)	Celda 3	Punto 1	P(1)	Cárcamo Este Macrocelda 1	EM1
Punto 2	P(2)	Punto 2	P(2)	Celda 4	Punto 2	P(2)	Cárcamo Norte Macrocelda 1	NM1
Punto 3	P(3)			Celda 8	Punto 3	P(3)	Cárcamo Noroeste Macrocelda 1	NWM1
Punto 4	P(4)			Celda 9	Punto 4	P(4)	Cárcamo Este Macrocelda 2	EM2
Punto 5	P(5)			Celda 12	Punto 5	P(5)	Cárcamo Este Macrocelda 3	EM3
Punto 6	P(6)			Celda 19	Punto 6	P(6)	Cárcamo Suroeste Macrocelda 7	SWM7
Punto 7	P(7)			Celda 20	Punto 7	P(7)	Cárcamo Sur Macrocelda 3	SM3
Punto 8	P(8)			Celda 26	Punto 8	P(8)	Cárcamo Oeste Macrocelda 6	WM6
Punto 9	P(9)			Celda 27	Punto 9	P(9)	Cárcamo Suroeste Macrocelda 6	SWM6
Punto 10	P(10)			Celda 32	Punto 10	P(10)	Cárcamo Este Macrocelda 6	EM6
Punto 11	P(11)			Celda 33			Cárcamo Oeste Macrocelda 4	WM4
				Celda 34			Canaleta Noroeste Macrocelda 4	NWM4
							Cárcamo Suroeste Macrocelda 1	SWM1
							Cárcamo Norte Macrocelda 4	NM4
							Cárcamo Sureste Macrocelda 3	SEM3
							Cárcamo Oeste Macrocelda 7	WM7
							Cárcamo Noreste Macrocelda 1	NEM1
							Cárcamo Oeste Macrocelda 2	WM2
							Cárcamo Oeste Macrocelda 3	WM3
							Cárcamo Sureste Macrocelda 6	SEM6
							Cárcamo Norte Macrocelda 7	NM7

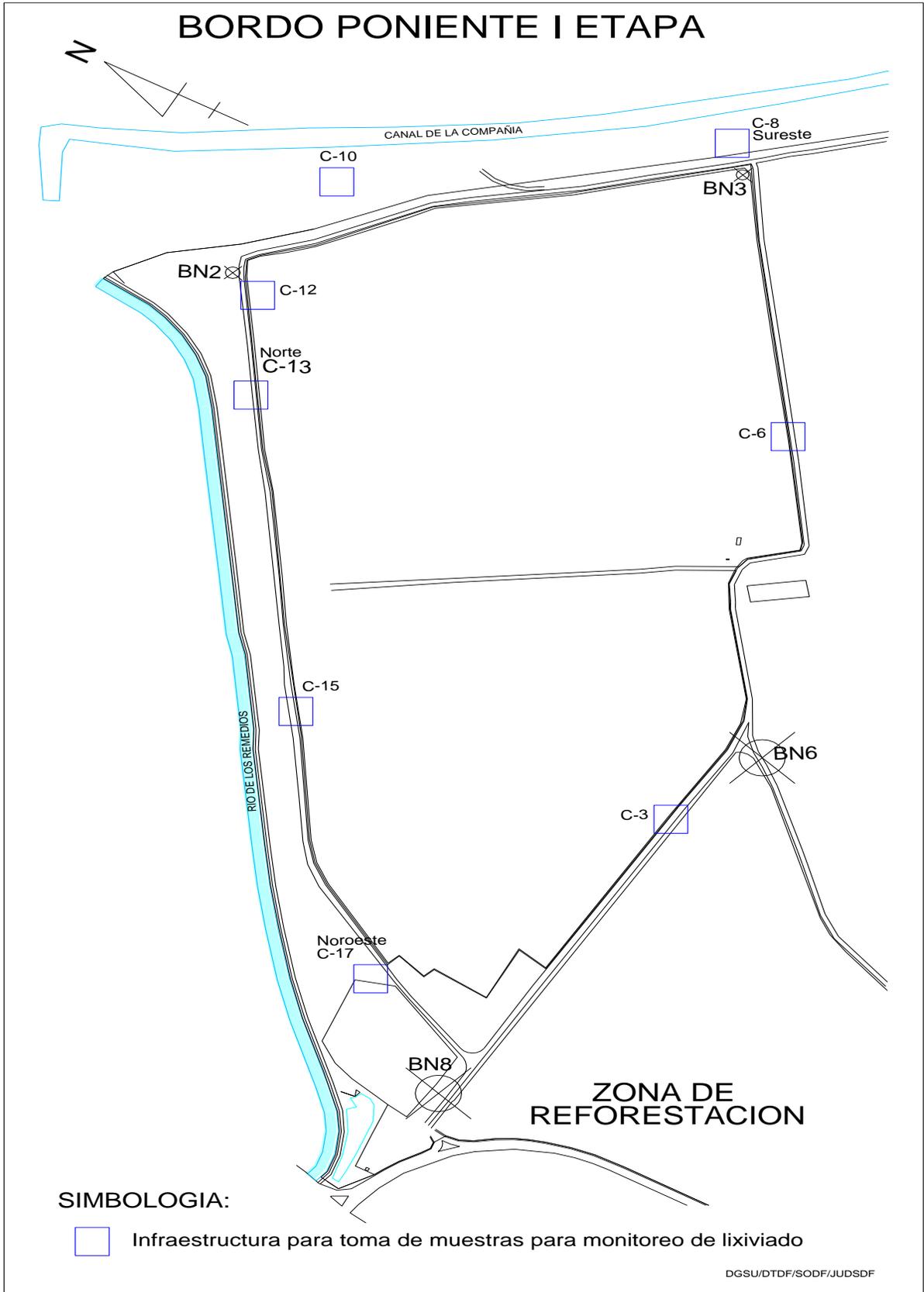


Figura 4-4. Ubicación de los puntos de monitoreo en la 1ª etapa del RSBP.

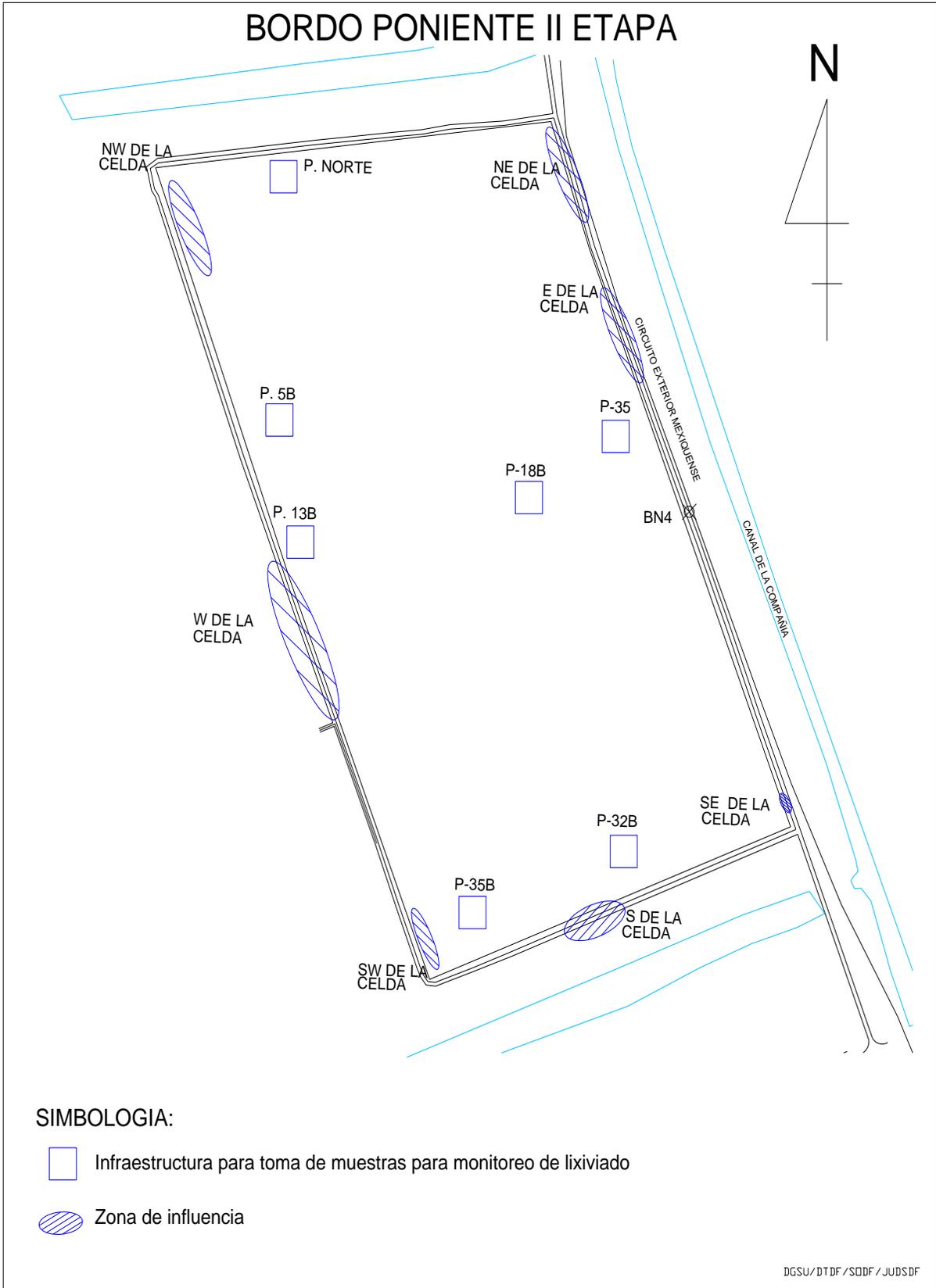


Figura 4-5. Ubicación de los puntos de monitoreo en la 2ª etapa del RSBP.

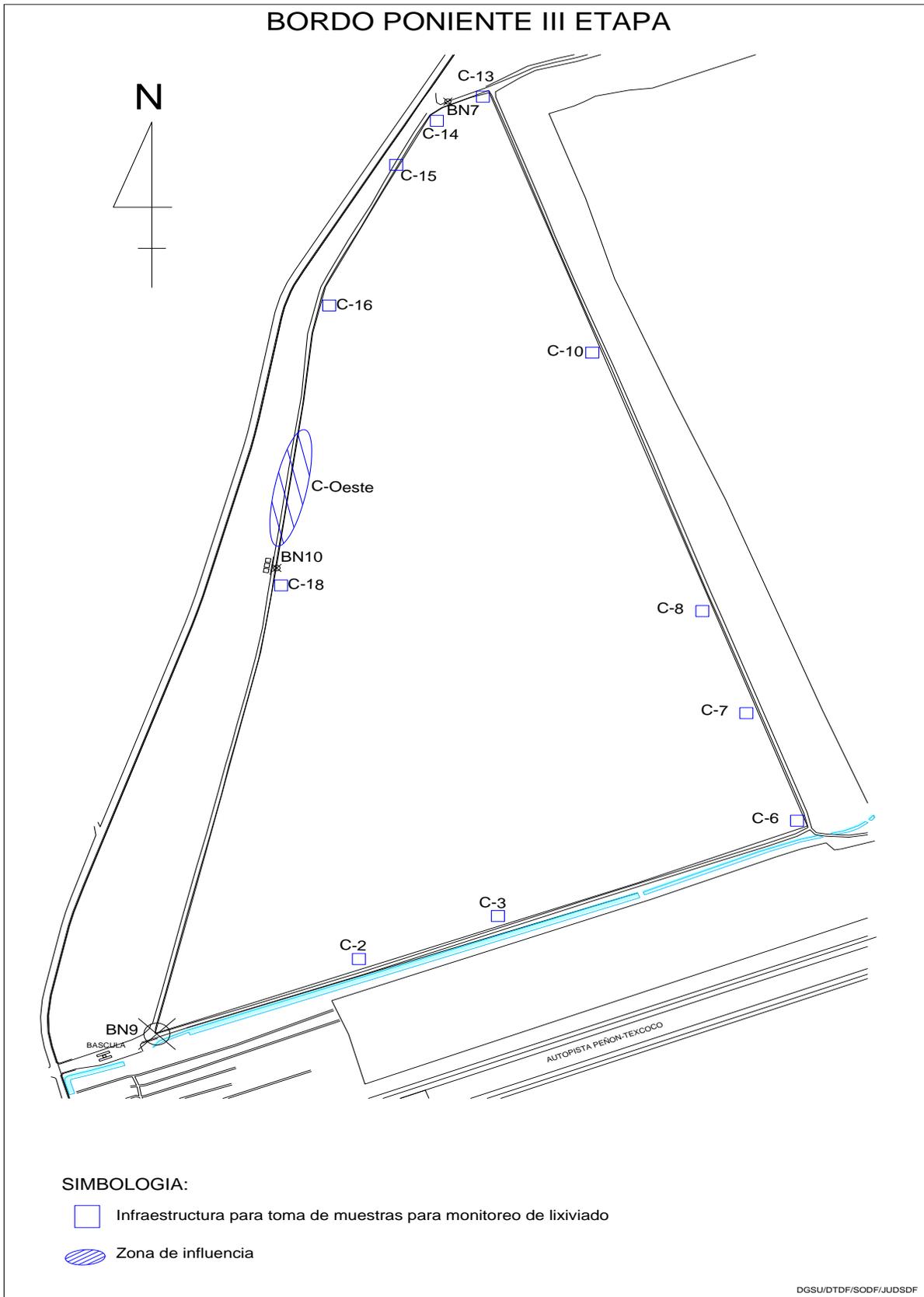


Figura 4-6. Ubicación de los puntos de monitoreo en la 3ª etapa del RSBP.

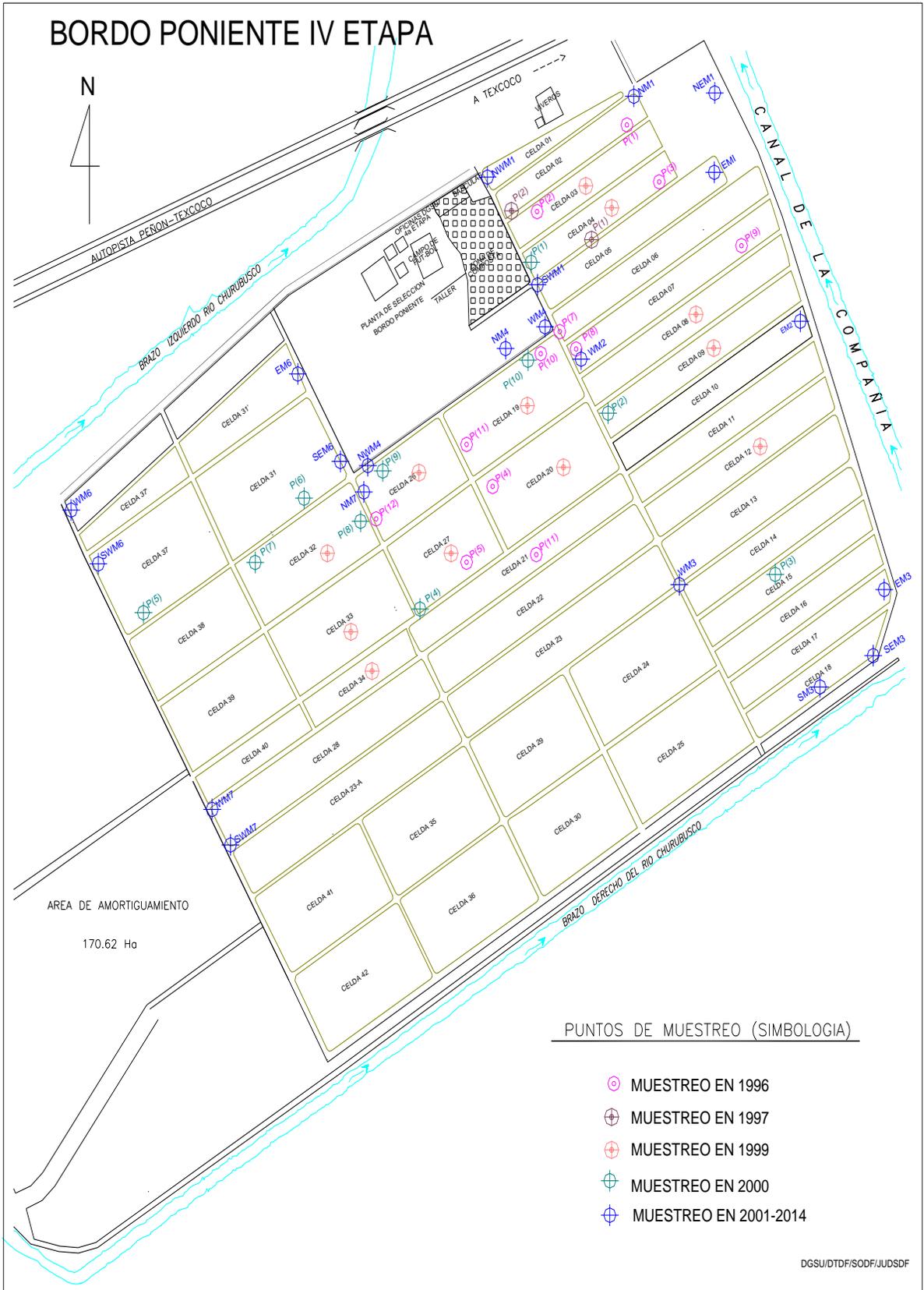


Figura 4-7. Ubicación de los puntos de monitoreo en la 4ª etapa del RSBP.

4.1.1.2. Métodos empleados para el análisis fisicoquímicos el lixiviado

El análisis fisicoquímico como parte fundamental del mantenimiento en la posclausura de un relleno sanitario de por lo menos 20 años^[27], permite obtener datos de manera oportuna y confiable, para conocer las características y comportamiento de la degradación de los residuos sólidos urbanos y con esto prever problemas de contaminación o tendencias en la variación de las propiedades.



Figura 4-8. Determinación de DQO y grasas y aceites en el Laboratorio Central de Biología Ambiental de la DTDF.

Los parámetros se evaluaron de acuerdo a las Normas Mexicanas (NMX), que son de aplicación voluntaria y como referencias de calidad, aclarando, como se mencionó anteriormente, no existe normatividad mexicana referente a caracterización y análisis fisicoquímico al lixiviado.

Las NMX's que se mencionan en la tabla 4-3, son técnicas analíticas para análisis de agua, pero debido a las concentraciones y propiedades fisicoquímicas propias del lixiviado, las técnicas se adaptaron para el estudio de lixiviado, en la figura 4-8 se puede apreciar parte del montaje experimental para realizar dos pruebas analíticas como es la DQO y la determinación de grasas y aceites, empleado en el Laboratorio Central de Biología Ambiental (LCBA) de la

Dirección de Transferencia y Disposición final de la DGSU, en este laboratorio además de las pruebas fisicoquímicas también se realizan determinaciones microbiológicas al lixiviado, partículas viables aerobiológicas, así como el análisis de la composición del biogás, entre otras determinaciones.

Tabla 4-3 Normas Mexicanas empleadas en el análisis de lixiviado.

Clave	Descripción
NMX-AA-004-SCFI-2013	Análisis de agua-medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba (cancela a la NMX-AA-004-SCFI-2000).
NMX-AA-005-SCFI-2000	Análisis de agua - determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-005-1980).
NMX-AA-007-SCFI-2000	Análisis de agua - determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-007-1980).
NMX-AA-008-SCFI-2011	Análisis de agua - determinación del pH - método de prueba-(cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2000).
NMX-AA-026-SCFI-2010	Análisis de agua-medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba-(cancela a la NMX-AA-026-SCFI-2001).(contiene aclaración del 29/04/2013)
NMX-AA-028-SCFI-2001	Análisis de agua-determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO ₅) y residuales tratadas-método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-1981).
NMX-AA-030/1-SCFI-2012	Análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- método de prueba - Parte 1 - Método de flujo abierto - (cancela a la NMX-AA-030-SCFI-2001).
NMX-AA-034-SCFI-2001	Análisis de agua-determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba (cancela a las NMX-AA-020-1980 y NMX-AA-034-1981).
NMX-AA-093-SCFI-2000	Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba (cancela a la NMX-AA-093-1984).

4.2. Segunda fase: Análisis fisicoquímicos

Se evaluaron y analizaron los resultados de la caracterización del lixiviado durante la operación y pos-clausura, desde el año 1996 en cada una de las cuatro etapas que conforman el relleno, hasta el año 2014 posterior a la clausura. Los análisis fisicoquímicos fueron realizados en el Laboratorio Central de Biología Ambiental de la Dirección de Transferencia y Disposición Final de la Dirección General de Servicios Urbanos.

4.2.1. Parámetros analizados

Los constituyentes químicos de las aguas son con frecuencia clasificados en inorgánicos y orgánicos. Suele decirse que los inorgánicos son los elementos como el calcio, cloruros, hierro cromo; también se encuentra en esta clasificación el amoníaco libre, nitrógeno orgánico, nitritos, nitratos, fósforo orgánico e inorgánico. Pruebas adicionales como el pH, alcalinidad, cloruros y sulfatos son realizadas para estimar la capacidad de reutilización en aguas residuales, que de igual forma se pueden aplicar al lixiviado.^[6]

Los orgánicos de mayor interés se clasifican como adicionados e individuales. La materia orgánica denominada como materia orgánica adicionada en aguas residuales (no en lixiviado), se constituye básicamente de proteínas (40 a 80%), carbohidratos (25 a 50%), y grasas y aceites (8 a 12%).^[6]

La importancia de evaluar compuestos orgánicos volátiles (COV's), se debe a la sospecha de su efecto carcinógeno, mutagénico y teratogénico o de toxicidad aguda alta, algunos ejemplos de estos compuestos son: benceno, bromoformo cloroformo, tolueno, tetracloroetano, tricloroetano y cloruro de vinilo entre muchos otros.^[6]

Para caracterizar al lixiviado y ver el comportamiento en sus propiedades se realizó el análisis por separado debido al tamaño que tiene cada una de las cuatro etapas que conforman el relleno (ver tabla 4-1). Los parámetros que se analizan en este estudio son: el pH, DQO, DBO₅, grasas y aceites, sólidos totales volátiles y sólidos suspendidos totales. Se ha mencionado anteriormente que los parámetros que se encuentran requeridos para monitoreo de

acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003, solamente son: pH, DBO₅, DQO y en este estudio no se evalúa el comportamiento de los metales pesados, no porque sea menos importante, sino porque se tienen muy pocos datos para hacer un análisis comparativo de estos elementos.

En ausencia de valores para los parámetros que requiere la NOM-083-SEMARNAT-2003 que se deben monitorear y en consecuencia los rangos no se encuentran establecidos, las referencias como punto de comparación se considera a los valores establecidos en las NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997, Tchobanoglous^[36] y Johannessen^[13], valores que se muestran en la tabla 4-4 y 4-5 respectivamente. Cabe aclarar que en la NOM-052-SEMARNAT-2005, *“Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos”*, no se tiene clasificado al lixiviado como una sustancia peligrosa, por tal motivo no se emplea los valores a que esta norma se refiere, además de que el rango de pH que maneja es muy amplio, el rango para un líquido o un sólido que cuando se mezcla con agua destilada es: pH menor o igual a 2.0 o mayor o igual a 12.5; el pH del lixiviado debería encontrarse fuera de estos valores para considerarse peligroso, por esta propiedad, los datos analizados demuestran que el rango en el lixiviado es $6.0 < \text{pH} < 9.0$, por lo tanto siguiendo este criterio se encuentra dentro de los parámetros establecidos como no peligroso; sin considerar las otras propiedades que conforman una caracterización: corrosivo, reactivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso (CRETIB), las cuales sí podrían darle propiedades de sustancia peligrosa. Cabe recordar que en México, el lixiviado tiene un manejo especial, ya sea para darle algún tratamiento físico, fisicoquímico y/o biológico, o recirculado en las celdas del relleno sanitario, o cualquier método que se permita emplear, de acuerdo con nuestra normatividad, pero no puede ser descargado directamente al algún receptor o cuerpo de agua, llámese río, laguna o el alcantarillado, entre otros.

Tabla 4-4. Rango de valores permitidos para algunas características propias del *agua* según la normatividad oficial de México (adaptado).

Parámetro	Unidad	NOM-001-SEMARNAT-1996 Punto 4.1, 4.2 y 4.3		NOM-002-SEMARNAT-1996 Punto 4.1, 4.3 al 4.6			NOM-003-SEMARNAT-1997 Punto 4.1	
		Límites máximos permisibles para contaminantes básicos en ríos con agua para uso público urbano, tipo de cuerpo receptor.		Límites máximos permisibles de parámetros regulados, para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.			Límites máximos permisibles de parámetros regulados para contaminantes en aguas residuales tratadas.	
		P. D.	P. M.	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo	A	B
pH		5	10	5.5	10			
Temperatura	°C	40						
Grasas y aceites	mg/L	15	25	50	75	100	15	15
Sólidos sedimentables	mL/L	1	2	50	75	100		
Sólidos suspendidos totales	mg/L	75	125	Referido a la NOM-001-SEMARNAT-1996			20	30
Demanda bioquímica de oxígeno ₅	mg/L	75	150				20	30

P. D. promedio diario,

P. M. promedio mensual,

A: Servicios al público con contacto directo, y

B: Servicios al público con contacto directo u ocasional.

Tabla 4-5. Clasificación del lixiviado de acuerdo a sus propiedades.

Parámetro	Unidad	Características de lixiviado en un relleno sanitario, fragmento de Johannessen ^[13]		Características de lixiviado según su edad en un relleno sanitario, fragmento Bhalla <i>et al.</i> ^[2]			Datos típicos de la composición del lixiviado procedente de rellenos sanitarios nuevos y maduros Tchobanoglous ^[36]		
		Etapa ácida (6 meses a 2 años)	Etapa metanogénica (2 a 100 años o más)	Joven (< 5 años)	Intermedio (5 – 10 años)	Viejo (> 10 años)	Relleno sanitario nuevo (menos de 2 años)		Relleno sanitario maduro (> 10 años)
							Rango ^a	Típico ^b	
pH	--	5 – 6.5	7.5 – 9	6.5	6.5 – 7.5	> 7.5	4.5 – 7.5	6	6.6 – 7.5
DQO	mg/L	20,000 – 30,000	1,500 – 2,000	> 10,000	4,000 – 10,000	< 4,000	3,000 – 60,000	18,000	100 – 500
DBO ₅	mg/L	10,000 – 25,000	500 – 1,000				2,000 – 30,000	10,000	100 – 200
DBO ₅ /DQO				> 0.3	0.1 – 0.3	< 0.1			

^a Rango representativo de valores. Se han presentado en la literatura sobre el tema valores máximos más altos para algunos de los constituyentes.

^b Los valores típicos para los rellenos sanitarios nuevos varía según su estado metabólico.

Las características fisicoquímicas se determinaron en laboratorio durante el año 2014 y se evaluó la composición química del lixiviado para conocer el grado de estabilización y contar con información pertinente que permita apreciar posibles impactos ambientales.

Para la descarga de lixiviado previamente tratado, en México no existen valores de referencia para este fin, al igual que en Estados Unidos de Norte América, pero en la normatividad de este último ^[18], solo tienen valores del lixiviado caracterizado para algunas localidades, como se puede apreciar en la tabla 4-6. En Alemania sí existen valores nacionales para la calidad de lixiviados previamente tratado para ser descargado, en la tabla 4-7 se muestran los parámetros que se deben de cumplir en Alemania para descargar lixiviado previamente tratado.

Tabla 4-6. Intervalo de concentración de contaminantes en lixiviados provenientes de residuos sólidos municipales en Estados Unidos de Norte América (fragmento).^[18]

Parámetro	Unidad	George (1972)	Chain/DeWalle (1977)	Metry/ Cross (1977)	Cameron (1978)	Wisconsin Informe (20 sitios)	Sobotka Informe (44 sitios)
pH		3.7 - 8.5	3.7 - 8.5	3.7 - 8.5	3.7 - 8.5	5 - 8.9	5.4 - 8.0
DQO	mg/L	0 - 89,520	40 - 89,520	800 - 750,000	0 - 9,000	6.6 - 97,900	440 - 50,450
DBO	mg/L	9 - 54,610	81 - 33,360	2,200 - 720,000	9 - 55,000	ND - 195,000	7 - 21,600
SST	mg/L	6 - 2,685	10 - 700	13 - 26,500		2 - 140,900	28 - 2,835

Tabla 4-7. Concentraciones límite para la descarga de lixiviado previamente tratado, de acuerdo a las normas alemanas.^[12]

Parámetro	Concentración mg/L	Parámetro	Concentración mg/L
DQO	200	Chromo	0.5
DBO ₅	20	Chromo (VI)	0.1
Nitrógeno, total (NH ₄ + NO ₂ + NO ₃)	70	Níquel	1
Fosforo, total	3	Lead	0.5
Hidrocarburos	10	Cobre	0.5
Nitritos-Nitrógeno	2	Zinc	2
Mercurio	0.05	Cianuro [#]	0.2
Cadmio	0.1	Sulfito	1

[#]: Cianuro liberado fácilmente

4.2.1.1. pH

La medición de pH es uno de los parámetros de mayor importancia y comúnmente empleado en un análisis fisicoquímico para cualquier tipo de agua, incluyendo al lixiviado. El potencial hidrogeno o pH, es un parámetro de suma importancia tanto para aguas naturales como para

aguas residuales. El rango de pH en el cual pueden interactuar los ecosistemas y sobrevivir las especies que lo conforman, está sumamente restringido, por lo cual si este valor es alterado, los procesos biológicos que normalmente se llevan a cabo pueden ser perturbados y/o inhibidos y las consecuencias son adversas.

El valor de pH es un parámetro regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a cuerpos receptores, también es un parámetro de calidad del agua para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano.^[21]

Los valores extremos de pH (de acuerdo a la escala de 1 a 14), son letales o inhibidores para los organismos vivientes, la alteración del pH en un ecosistema puede causar la muerte de peces; el rango adecuado de pH para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es relativamente estrecho,^[33] en general es entre $5 < \text{pH} < 9$. La evaluación del pH, según la norma NMX-AA-008-SCFI-2011, sirve para dar seguimiento a un proceso, ya sea de neutralización, biológico aerobio o anaerobio, debido a que muchas reacciones dependen de esta propiedad.^[6]

4.2.1.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

La Demanda química de oxígeno, es la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar químicamente el material orgánico en condiciones severas. La diferencia de la DQO y la DBO₅ es que en esta última prueba solo se detecta el material orgánico degradado biológicamente o que es biodegradable. En la determinación de DQO todo el material orgánico biodegradable y no biodegradable es químicamente oxidado por el dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) en medio ácido en presencia de sulfato de plata (Ag₂SO₄) como catalizador.^[6]

Así la DQO corresponde a la cantidad de oxígeno requerida para oxidar, completamente por medios químicos, los compuestos orgánicos a CO₂ y H₂O. En la práctica, la materia orgánica en agua es oxidada por el K₂Cr₂O₇, bajo condiciones estrictas (en medio de ácido sulfúrico

concentrado, y a una temperatura de ebullición). La cantidad de oxígeno del dicromato usado es determinada y expresada como DQO.

Una importante ventaja de este método es que cuantifica tanto la materia orgánica disuelta como las pequeñas partículas suspendidas o coloidales.

Cabe aclarar que este parámetro no se encuentra reglamentado en las NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997; solamente la NOM-083-SEMARNAT-2003 requiere del monitoreo de este parámetro. La norma en la cual se basó el método analítico empleado para esta prueba es la NMX-AA-030/1-SCFI-2012.

4.2.1.3. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

La DBO₅ es uno de los parámetros de mayor importancia en el estudio y caracterización de las aguas no potables. La determinación de DBO₅, además de indicarnos la presencia y biodegradabilidad del material orgánico presente, es una forma de estimar la cantidad de oxígeno que se requiere para estabilizar el carbono orgánico y conocer la velocidad de metabolización del material por las bacterias, que normalmente se encuentran presentes en las aguas residuales. En este caso, en los desechos sólidos y en el lixiviado.

La DBO₅ mide la cantidad de oxígeno requerida por microorganismos para degradar la materia orgánica en forma biológica y es un proceso que indica si la materia es biodegradable.

La importancia de este parámetro requiere de ciertos cuidados y atención en la técnica analítica, ya que por ser un proceso biológico el manejo y tratamiento de la muestra es delicado, el método analítico empleado es el que se describe en la norma NMX-AA-028-SCFI-2001.

4.2.1.4. Grasas y aceites

El término “grasas y aceites” se aplica a una amplia variedad de sustancias orgánicas con características especiales en su baja solubilidad en agua y su tendencia a formar películas finas sobre la superficie del agua; incluyen hidrocarburos, ácidos grasos, jabones, grasas, ceras y aceites. Son los compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, aceites minerales incluyen petróleo, hidrocarburos y grasas ya sean polares o no polares. Aceite a base de petróleo y grasa (compuestos no polares) se producen en las empresas que las utilizan, y aceite de origen vegetal y grasa (compuestos polares)^[17]. Productos que son extraídos de la muestra utilizando hexano como disolvente.

Este método permite una estimación del contenido de grasas y aceites en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, al determinar gravimétricamente las sustancias que son extraídas con hexano de una muestra acuosa acidificada. Esta determinación es indicativa del grado de contaminación del agua por usos industriales y humanos y como valor en promedio diario, de acuerdo a la normatividad mexicana, según la NOM-001-SEMARNAT-1996 es de 15 mg/L, para un promedio diario y 25 mg/L para un promedio mensual, como se mostró en la tabla 4-4.

En la determinación de grasas y aceites no se mide una sustancia específica sino un grupo de sustancias con unas mismas características fisicoquímicas (solubilidad), y se determinan cuantitativamente grupos de sustancias con características físicas similares sobre la base de la solubilidad, comúnmente en un solvente específico; la técnica menciona que se debe emplear hexano pero en ocasiones se empleaba cloroformo. Como se mencionó en el párrafo anterior esta prueba sirve para determinar ácidos grasos, jabones, grasas, ceras, hidrocarburos, aceites y cualquier otra sustancia susceptible de ser extraída con hexano.^[20]

Los problemas ocasionados son por este grupo de lípidos es debido a su limitada solubilidad en agua y a la película que forman en la superficie líquida, interfiriendo con los procesos aerobios, ya que inhiben la transferencia de oxígeno atmosférico al agua, que es elemento indispensable para la vida en los cuerpos receptores^[33]. El procedimiento analítico empleado es el que describe la norma NMX-AA-005-SCFI-2000.

4.2.1.5. Sólidos totales volátiles

Sólidos totales volátiles (SVT), representan la cantidad de materia orgánica (incluidos aquellos inorgánicos) capaz de volatilizarse por el efecto de la calcinación a $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de 15 a 20 minutos.^[23]

El contenido de sólidos volátiles frecuentemente se emplea como una forma de medir la biodegradabilidad de los constituyentes orgánicos en los residuos sólidos urbanos, aunque este resultado no es muy preciso, debido a que algunos componentes son volátiles pero no se degradan rápidamente, como pueden ser el papel periódico y algunos residuos vegetales; la velocidad de degradación varía notablemente^[36], en algunas perforaciones y “calas” realizadas en el relleno se ha llegado a encontrar material orgánico que no ha sido atacado con el paso del tiempo, objetos como, tela de algodón, papel periódico y madera entre muchos otros, además de compuestos inorgánicos como recipientes metálicos de alimentos “latas” que siguen protegidos por el esmalte que se les aplico para preservar su contenido.

Aunque existe la NMX-AA-034-SCFI-2001 *Análisis de agua-determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba*, este parámetro no se encuentra regulado de manera oficial. Pero puede ser de gran ayuda cuando se pretende dar tratamiento a lixiviado ya que es una forma de medir la eficiencia de remoción en el proceso que se elija, o como una posible extrapolación para determinar la biodegradabilidad de la materia contenida en el líquido. Para la evaluación de este parámetro se siguió la metodología descrita en la norma NMX-AA-034-SCFI-2001.

4.2.1.6. Sólidos suspendidos totales

Sólidos suspendidos totales (SST), son los sólidos constituidos por sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.^[23]

Este parámetro se encuentra reglamentado para agua, aunque que no existen valores para lixiviado, los valores se muestran en la tabla 4-4. El procedimiento empleado en la prueba analítica es el que describe la norma NMX-AA-034-SCFI-2001.

4.3. Tercera fase: Determinación en laboratorio las características fisicoquímicas para el año 2014

Se evaluó la composición química del lixiviado para conocer el grado de estabilización en el año 2014, para contar con información pertinente que permitiera apreciar posibles impactos ambientales.

Las propiedades analizadas en el presente estudio fueron determinadas en LCBA de la Dirección de Transferencia y Disposición Final de la DGSU. Las características fisicoquímicas correspondientes a los meses de septiembre para la etapa 1, noviembre para las etapas 2 y 3 y finalmente octubre para la etapa 4, estos datos se obtuvieron de acuerdo a su frecuencia y su propio calendario de monitoreo. Los métodos analíticos empleados fueron establecidos según los procedimientos descritos en las NMX's mostradas en la tabla 4-3.

Además se realizó un análisis de lixiviado en el laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, correspondiente a los meses de mayo y septiembre para un punto de cada una de las etapas del relleno.

5. RESULTADOS

Existen valores de los cuales no se tiene registrada la ubicación precisa, en los archivos consultados, para los años 2006, 2007 y 2008, solo se hace referencia a la etapa en donde se realizó el muestreo. Mas sin embargo, aunque estos datos no se grafican, sí se consideran para obtener los valores promedio.

En el punto 5.4 se mostrarán las gráficas que describen el comportamiento y la tendencia de las propiedades analizadas para cada una de las etapas del relleno sanitario

5.1. Parámetros fisicoquímicos evaluados

5.1.1. pH

Como se puede apreciar en las figuras 5-5, 5-12, 5-19 y 5-26, para cada una las etapas 1, 2, 3 y 4 respectivamente, el valor del pH que tiene el lixiviado en los primeros años de operación de un relleno sanitario inicia en valores cercanos a 6.50 y comparando este valor con los que se han obtenido en los análisis practicados al lixiviado, se observa que desde el inicio presenta valores promedio de 8.23. Con este valor se tendría una edad según la tabla 4-5 de un lixiviado “viejo”, o sea de una edad mayor a 10 años tanto para Johannessen^[13] como para Tchobanoglous,^[36] esto demuestra que el pH sigue conservando su comportamiento con el paso del tiempo, el rango de los valores obtenidos se muestra en la tabla 5-1, lo que hace suponer que existen condiciones ajenas a los desechos sólidos que refleja este valor de pH, siendo similar en las cuatro etapas como se puede apreciar en la tabla 5-1 que comparada con la tabla 5-2, en el lixiviado no observó que correspondieran a la etapa de acidificación, más sin embargo tuvo que haberse presentado esta fase de reacción.

Tabla 5-1. Resumen del comportamiento del pH en lixiviado en el RSBP.

pH				
Zona	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Etapa 1	6.52	9.96	8.23	0.40
Etapa 2	6.29	9.78	8.10	0.56
Etapa 3	6.42	9.88	8.28	0.43
Etapa 4	6.37	10.80	8.07	0.46

Tabla 5-2. Clasificación del lixiviado de acuerdo al pH.

Características de lixiviado en un relleno sanitario, fragmento de Johannessen. ^[13]		Características de lixiviado según su edad en un relleno sanitario, fragmento Bhalla et al. ^[2]			Datos típicos de la composición del lixiviado procedente de rellenos sanitarios nuevos y maduros Tchobanoglous. ^[36]		
Etapa ácida (6 meses a 2 años)	Etapa metanogénica (2 a 100 años o más)	Joven (< 5 años)	Intermedio (5 – 10 años)	Viejo (> 10 años)	Relleno sanitario nuevo (menos de 2 años)		Relleno sanitario maduro (> 10 años)
					Rango ^a	Típico ^b	
5.0 – 6.5	7.5 – 9.0	6.5	6.5 – 7.5	> 7.5	4.5 – 7.5	6.0	6.6 – 7.5

^a Rango representativo de valores. Se han presentado en la literatura sobre el tema valores máximos más altos para algunos de los constituyentes.

^b Los valores típicos para los rellenos sanitarios nuevos varía según su estado metabólico

5.1.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

Los valores encontrados en el lixiviado son tan variados como se puede apreciar en las figuras 5-6, 5-13, 5-20 y 5-27, para cada una las etapas 1, 2, 3 y 4 respectivamente y dependen de las condiciones climatológicas, pues en un mismo año se tiene un amplio rango en los resultados. Según Johannessen^[13] y Tchobanoglous,^[36] equivale a tener un lixiviado en la fase metanogénica o etapa “viejo”, pero el lixiviado presenta este comportamiento, aun cuando estaba en plena operación el relleno, teniendo pocos meses o años de producción de este líquido. En el estudio se encontraron los valores que se reportan en la tabla 5-3, así es que estas características correspondería a un lixiviado “joven” lo cual presenta una contradicción, estos datos se puede apreciar en la tabla 5-4.

Tabla 5-3. Resumen del comportamiento de la demanda química de oxígeno en lixiviado en el RSBP.

DQO (mg O ₂ /L)				
Zona	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Etapa 1	83	11,423	2,911	2,060
Etapa 2	183	19,638	3,620	2,505
Etapa 3	17	6,547	1,493	1,240
Etapa 4	116	20,058	5,127	2,874

Tabla 5-4. Clasificación del lixiviado de acuerdo a la DQO.

Características de lixiviado en un relleno sanitario, fragmento de Johannessen. ^[13]		Características de lixiviado según su edad en un relleno sanitario, fragmento Bhalla <i>et al.</i> ^[2]			Datos típicos de la composición del lixiviado procedente de rellenos sanitarios nuevos y maduros Tchobanoglous. ^[36]		
Etapa ácida (6 meses a 2 años)	Etapa metanogénica (2 a 100 años o más)	Joven (< 5 años)	Intermedio (5 – 10 años)	Viejo (> 10 años)	Relleno sanitario nuevo (menos de 2 años)		Relleno sanitario maduro (> 10 años)
					Rango ^a	Típico ^b	
20,000 – 30,000	1,500 – 2,000	> 10,000	4,000 – 10,000	< 4,000	3,000 – 60,000	18,000	100 – 500

^a Rango representativo de valores. Se han presentado en la literatura sobre el tema valores máximos más altos para algunos de los constituyentes.

^b Los valores típicos para los rellenos sanitarios nuevos varía según su estado metabólico

5.1.3. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

De acuerdo al análisis realizado los valores promedio encontrados en el presente estudio son los que se muestran en la tabla 5-5, así como en las figuras 5-7, 5-14, 5-21 y 5-28, para cada una las etapas 1, 2, 3 y 4 respectivamente, pero de acuerdo a Johannessen^[13] y Tchobanoglous^[36], como se puede apreciar en la tabla 5-6 el lixiviado se encuentra en la fase denominada “*maduro*”.

Tabla 5-5. Resumen del comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en lixiviado en el RSBP.

DBO ₅ (mg/L)				
Zona	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Etapa 1	25	2,759	330	377
Etapa 2	22	4,771	557	569
Etapa 3	7	1,925	184	230
Etapa 4	41	6,416	608	602

Tabla 5-6. Clasificación del lixiviado de acuerdo a la DBO₅.

Características de lixiviado en un relleno sanitario, fragmento de Johannessen. ^[13]		Características de lixiviado según su edad en un relleno sanitario, fragmento Bhalla <i>et al.</i> ^[2]			Datos típicos de la composición del lixiviado proveniente de rellenos sanitarios nuevos y maduros Tchobanoglous. ^[36]		
Etapa ácida (6 meses a 2 años)	Etapa metanogénica (2 a 100 años o más)	Joven (< 5 años)	Intermedio (5 – 10 años)	Viejo (> 10 años)	Relleno sanitario nuevo (menos de 2 años)		Relleno sanitario maduro (> 10 años)
					Rango ^a	Típico ^b	
10,000 – 25,000	500 – 1,000				2,000 – 30,000	10,000	100 – 200

^a Rango representativo de valores. Se han presentado en la literatura sobre el tema valores máximos más altos para algunos de los constituyentes.

^b Los valores típicos para los rellenos sanitarios nuevos varía según su estado metabólico.

5.1.4. Grasas y aceites

Propiedad que se encuentra normada como con un valor de 15 mg/L para aguas según la NOM-001-SEMARNAT-1996, valor que es rebasado por mucho, de acuerdo al análisis realizado en el presente estudio, la disparidad de los valores se puede apreciar en la tabla 5-7, así como en las figuras 5-8, 5-15, 5-22 y 5-29, para cada una las etapas 1, 2, 3 y 4 respectivamente, además se puede apreciar que el rango entre el máximo y el mínimo es muy amplio

Tabla 5-7. Resumen del comportamiento de las grasas y aceites en lixiviado en el RSBP.

Grasas y Aceites (mg/L)				
Zona	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Etapa 1	9	1,366	117	127
Etapa 2	11	1,648	151	183
Etapa 3	9	2,001	105	142
Etapa 4	4	988	165	137

5.1.5. Sólidos totales volátiles

Los valores, de esta propiedad no reglamentada, que caracterizan al lixiviado de Bordo Poniente, como se aprecia en las tabla 5-8, así como en las figuras 5-9, 5-16, 5-23 y 5-30, para cada una las etapas 1, 2, 3 y 4 respectivamente, nos demuestra la gran cantidad de sólidos

presentes en el lixiviado, que pudiera suponerse que es lo que influye en gran medida para darle coloración a este líquido. Es una forma indirecta, no precisa, de medir la carga orgánica presente en el lixiviado.

Tabla 5-8. Resumen del comportamiento de los sólidos totales volátiles en lixiviado en el RSBP.

Sólidos Totales Volátiles (mg/L)				
Zona	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Etapa 1	2,450	2,632	1,574	3,595
Etapa 2	256	18,320	2,632	1,792
Etapa 3	0	9,030	1,574	947
Etapa 4	43	16,000	3,595	1,635

5.1.6. Sólidos suspendidos totales

Los valores obtenidos en los análisis efectuados al lixiviado como se muestra en la tabla 5-9, así como en las figuras 5-10, 5-17, 5-24 y 5-31, para cada una las etapas 1, 2, 3 y 4 respectivamente van desde 25 hasta 1,035 mg/L, lo que indica que se encuentra fuera del límite, de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 son de 75 mg/L (promedio diario) a 125 mg/L (promedio mensual) y para la NOM-003-SEMARNAT-1997, que son de 20 mg/L (servicios al público con contacto directo) a 30 mg/L (servicios al público con contacto directo u ocasional), aclarado, estos valores son para agua en sus diferentes usos y no para lixiviado, pero sirven de referencia.

Este parámetro nos muestra la gran carga que se tiene en el lixiviado lo que influye de manera directa en la DQO.

Tabla 5-9. Resumen del comportamiento de los sólidos suspendidos totales en lixiviado en el RSBP.

Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)				
Zona	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Etapa 1	5	645	151	93
Etapa 2	15	6,595	384	727
Etapa 3	0	640	110	80
Etapa 4	0	9,450	304	513

5.2.Comparativo de datos

En la tabla 5-10 se muestra la composición promedio, así como en las tablas 5-11 a la 5-14 se pueden apreciar los valores máximos, mínimos y promedio para cada una de las cuatro etapas del relleno valores promedio obtenidos para el periodo de estudio, para dar un panorama general del estado en que se encuentra el RSBP en sus cuatro etapas.

Tabla 5-10. Composición promedio del lixiviado en el RSBP (datos obtenidos en este estudio).

Medición	Parámetro	Unidad	Promedio			
			Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Campo	pH		8.23	8.10	8.28	8.07
	Temperatura	°C	19.68	22.73	19.51	22.72
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	25,549.43	27,597.10	18,339.10	33,260.53
Laboratorio	Sólidos Sedimentables	mL/L	0.41	2.99	0.95	0.73
	Sólidos Totales Totales	mg/L	15,742.25	15,150.38	11,213.25	18,921.45
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	2,450.08	2,631.73	1,573.53	3,595.22
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	13,272.37	12,460.83	9,848.41	14,859.34
	Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	151.04	383.78	109.70	304.13
	Sólidos Suspendedos Volátiles	mg/L	65.96	148.65	41.79	110.73
	Sólidos Suspendedos Fijos	mg/L	118.14	451.36	78.26	207.66
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	15,643.88	14,683.30	11,517.67	18,425.77
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	2,440.51	2,611.83	1,625.54	3,807.75
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	13,190.41	12,082.44	9,870.67	14,570.02
	Grasas y Aceites	mg/L	117.40	151.43	104.61	165.06
	DQO	mg O ₂ /L	2,910.83	3,620.00	1,492.93	5,127.32
	DBO ₅	mg/L	329.84	557.31	184.28	608.14
	Nitrógeno total*	mg/L	782.35	1,062.97	542.67	1,464.92
	Nitrógeno amoniacal*	mg/L	142.63	286.56	268.40	344.81
	Nitrógeno Orgánico*	mg/L	595.99	785.89	294.20	1,691.59
	Peso específico*	mg/L	1.02	1.02	1.01	
	Cloruros*	mg/L	5,285.76	3,834.45	3,955.19	
	Carbonatos*	mg/L	768.48	1,081.60	554.83	
	Bicarbonatos*	mg/L	7,920.37	9,772.80	6,483.54	
Alcalinidad*	mg/L	8,695.27	10,854.40	7,038.37		

* Estos parámetros se evaluaron de manera esporádica, no cubren todo el periodo de estudio.

Tabla 5-11 Valores mínimos y máximos para cada una las propiedades en el periodo 1996 a 2014 de la Etapa 1 del RSBP.

Etapa 1						
Parámetros		Unidades	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Campo	pH		6.52	9.96	8.23	0.40
	Temperatura	°C	2.10	28.00	19.68	2.63
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	8	90,906	25,549	13,240
Laboratorio	Sólidos Sedimentables	mL/L	0.10	6.00	0.41	0.69
	Sólidos Totales Totales	mg/L	994	59,800	15,742	7,520
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	7	7,610	2,450	1,078
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	833	53,000	13,272	6,561
	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	5	645	151	93
	Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	0	1,075	66	79
	Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	0	13,330	118	565
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2,020	59,225	15,644	7,434
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	302	16,415	2,441	1,274
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	1,485	52,625	13,190	6,564
	Grasas y Aceites	mg/L	9	1,366	117	127
	DQO	mg O ₂ /L	83	11,423	2,911	2,060
	DBO ₅	mg/L	25	2,759	330	377
	Nitrógeno total*	mg/L	160	1,634	782	545
	Nitrógeno amoniacal*	mg/L	52	301	143	71
	Nitrógeno Orgánico*	mg/L	82	1,523	596	548
	Peso específico*	mg/L	1.00	1.05	1.02	0.01
	Cloruros*	mg/L	419	13,684	5,286	3,047
	Carbonato*s	mg/L	9	1,626	768	515
	Bicarbonato*s	mg/L	1,139	14,814	7,920	5,114
Alcalinidad*	mg/L	1,238	16,083	8,695	5,523	
Relación (DBO ₅ /DQO)	mg/L	0.297	0.241	0.113	0.162	

* Estos parámetros se evaluaron de manera esporádica, no cubren todo el periodo de estudio.

Tabla 5-12. Valores mínimos y máximos para cada una las propiedades en el periodo 1996 a 2014 de la Etapa 2 del RSBP.

Etapa 2						
Parámetros		Unidades	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Campo	pH		6.29	9.78	8.10	0.56
	Temperatura	°C	8.00	32.00	22.73	3.48
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	4	78,613	27,597	17,035
Laboratorio	Sólidos Sedimentables	mL/L	0.10	84.00	2.99	6.82
	Sólidos Totales Totales	mg/L	860	52,520	15,150	11,264
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	256	18,320	2,632	1,792
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	10	41,300	12,461	10,423
	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	15	6,595	384	727
	Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	0	3,840	149	302
	Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	0	39,740	451	2,329
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	690	52,160	14,683	10,717
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	150	36,005	2,612	2,459
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	136	40,990	12,082	9,979
	Grasas y Aceites	mg/L	11	1,648	151	183
	DQO	mg O ₂ /L	183	19,638	3,620	2,505
	DBO ₅	mg/L	22	4,771	557	569
	Nitrógeno total*	mg/L	21	2,528	1,063	675
	Nitrógeno amoniacal*	mg/L	32	1,572	287	419
	Nitrógeno Orgánico*	mg/L	48	2,412	786	704
	Peso específico*	mg/L	1.01	1.02	1.02	0.00
	Cloruros*	mg/L	670	7,841	3,834	1,921
	Carbonato*s	mg/L	934	1,338	1,082	223
	Bicarbonato*s	mg/L	8,480	11,008	9,773	1,265
Alcalinidad*	mg/L	9,453	12,346	10,854	1,448	
Relación (DBO ₅ /DQO)	mg/L	0.121	0.243	0.154	0.186	

* Estos parámetros se evaluaron de manera esporádica, no cubren todo el periodo de estudio.

Tabla 5-13. Valores mínimos y máximos para cada una las propiedades en el periodo 1996 a 2014 de la Etapa 3 del RSBP.

Etapa 3						
Parámetros		Unidades	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Campo	pH		6.42	9.88	8.28	0.43
	Temperatura	°C	10.00	30.00	19.51	2.30
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	40	47,515	18,339	12,118
Laboratorio	Sólidos Sedimentables	mL/L	0.00	20.10	0.95	2.18
	Sólidos Totales Totales	mg/L	67	52,590	11,213	7,029
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	0	9,030	1,574	947
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	86	53,300	9,848	6,517
	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	0	640	110	80
	Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	0	1,500	42	77
	Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	0	1,040	78	81
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	55	118,515	11,518	8,702
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	0	50,530	1,626	2,204
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	490	116,525	9,871	7,720
	Grasas y Aceites	mg/L	9	2,001	105	142
	DQO	mg O ₂ /L	17	6,547	1,493	1,240
	DBO ₅	mg/L	7	1,925	184	230
	Nitrógeno total*	mg/L	18	1,856	543	551
	Nitrógeno amoniacal*	mg/L	1	1,652	268	505
	Nitrógeno Orgánico*	mg/L	0	1,102	294	292
	Peso específico*	mg/L	1.00	1.02	1.01	0.01
	Cloruros*	mg/L	366	9,430	3,955	1,992
	Carbonato*s	mg/L	60	1,097	555	388
	Bicarbonato*s	mg/L	2,084	8,945	6,484	3,335
Alcalinidad*	mg/L	2,144	10,042	7,038	3,691	
Relación (DBO ₅ /DQO)	mg/L	0.408	0.294	0.123	0.207	

* Estos parámetros se evaluaron de manera esporádica, no cubren todo el periodo de estudio.

Tabla 5-14. Valores mínimos y máximos para cada una las propiedades en el periodo 1996 a 2014 de la Etapa 4 del RSBP.

Etapa 4						
Parámetros		Unidades	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Campo	pH		6.37	10.80	8.07	0.46
	Temperatura	°C	14.00	33.00	22.72	3.16
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	4	90,556	33,261	12,848
Laboratorio	Sólidos Sedimentables	mL/L	0.10	23.00	0.73	1.65
	Sólidos Totales Totales	mg/L	15	219,370	18,921	13,247
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	43	16,000	3,595	1,635
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	125	214,060	14,859	10,040
	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	0	9,450	304	513
	Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	0	2,215	111	137
	Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	0	13,915	208	596
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	855	218,985	18,426	11,667
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	7	104,800	3,808	5,352
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	525	213,885	14,570	9,526
	Grasas y Aceites	mg/L	4	988	165	137
	DQO	mg O ₂ /L	116	20,058	5,127	2,874
	DBO ₅	mg/L	41	6,416	608	602
	Nitrógeno total*	mg/L	199	3,130	1,465	913
	Nitrógeno amoniacal*	mg/L	3	2,740	345	639
Nitrógeno Orgánico*	mg/L	92	22,276	1,692	3,683	

* Estos parámetros se evaluaron de manera esporádica, no cubren todo el periodo de estudio; ND no disponible.

Realizando un análisis con respecto a los reportados en estudios con rellenos sanitarios de otros países (tablas 5-15)^{[3][34]}, se puede observar la diferencia que existe en los valores que se tienen con respecto al Relleno sanitario Bordo Poniente, con esto se confirma que cada relleno es único debido a los desecho depositados y condicione climatológicas propias del sitio.

Tabla 5-15. Comparativo de características del lixiviado del Relleno Sanitario Bordo Poniente respecto a otros países.

Parámetro	Unidad	Análisis de lixiviado en Noruega y el Noroeste de Estados Unidos de Norte América. ^[B3]								Caracterización de lixiviado para diferentes países por Martin Carville y Howard Robinson. ^[B]				Etapa 1 del RSBP. (1996 a 2014)		Etapa 2 del RSBP. (1996 a 2014)		Etapa 3 del RSBP. (1996 a 2014)		Etapa 4 del RSBP. (1996 a 2014)	
		Noruega						Estados Unidos de N. A.		Hong Kong	Sudeste de Asia	Sudáfrica	Reino Unido	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
		Gronmo	Bránásdalen	Yggeseth	Isi I	Isi II	Taranrod	Cedar Hills	Kent Highland												
pH	---									7.4–8.6	6.0–8.4	7.5–8.3	7.4–8.5	6.52	9.96	6.29	9.78	6.42	9.88	6.37	10.80
DQO	mg/L	470	1,080	9,425	825	110	3,455	38,800	3,800	650–2,800	1,600–13,000	1,400–6,000	2,600–8,500	83	11,423	183	19,638	17	6,547	116	20,058
DBO ₅	mg/l	320	870	5,250	590	50	2,300	24,500	2,460	45–400	–	300–700	90–3,000	25	2,759	22	4,771	7	1,925	41	6,416
N – total	mg/L	182	254	250	155	166	156	630	56					160	1,634	21	2,528	18	1,856	199	3,130
N - NH ₄	mg/L	120	225	227	141	102	84			1,200–3,000	1,200–3,000	900–3,000	1,100–2,500	52	301	32	1,572	1	1,652	3	2,740
N – org.	mg/L	62	29	23	14	6	71							82	1,523	48	2,412	0	1,102	92	22,276
Sól. tot. tot.	mg/L	760	1,005	2,180	890	145	1,670							994	59,800	860	52,520	67	52,590	15	219,370
Sól. tot. vol.	mg/L	85	98	182	229	11	602	170	90					7	7,610	256	18,320	0	9,030	43	16,000
Sól. tot. fijos	mg/L													833	53,000	10	41,300	86	53,300	125	214,060
Sól. susp. tot.	mg/L	140	397	466	270	68	1,079	310	220					5	645	15	6,595	0	640	0	9,450
Sól. susp. vol.	mg/L													0	1,075	0	3,840	0	1,500	0	2,215
Sól. susp. fijos	mg/L													0	13,330	0	39,740	0	1,040	0	13,915
Sól. dis. tot.	mg/L													2,020	59,225	690	52,160	55	118,515	855	218,985
Sól. dis. vol.	mg/L													302	16,415	150	36,005	0	50,530	7	104,800
Sól. Dis. Fijos	mg/L													1,485	52,625	136	40,990	490	116,525	525	213,885
Grasas y aceites	mg/L													9	1,366	11	1,648	9	2,001	4	988
Cloruros	mg/L									500–3,000	2,500–6,300	1,200–4,000	1,700–5,200	419	13,684	670	7,841	366	9,430	ND	ND
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/L									3,000–12,000	8,000–40,000	3,000–12,000	7,000–17,000	1,238	16,083	9,453	12,346	2,144	10,042	ND	ND

ND dato no disponible

Se eligió de manera aleatoria el año de 2003 para ejemplificar el comportamiento del pH y en el año de 2007 para observar la variación de la DQO y la DBO₅ en este periodo de tiempo, lo que demuestra que existe una gran variación en el comportamiento de estas propiedades, el comportamiento del lixiviado es muy variado, ya que depende de las condiciones climatológicas, composición de los desechos, edad del relleno, distribución de la humedad y posición geográfica, lo que le proporciona características típicas, este comportamiento se puede apreciar en las figuras 5-1 a la 5-3.

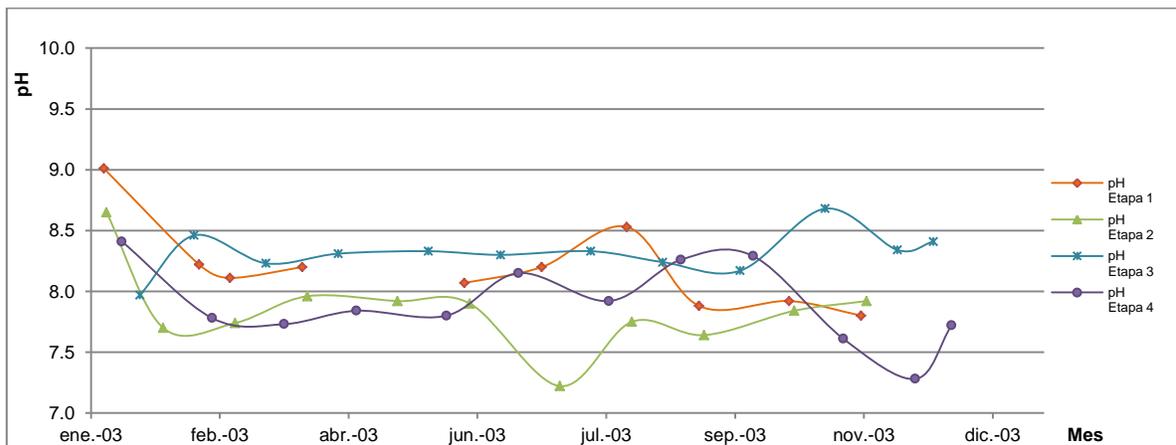


Figura 5-1. Tendencia del pH en función del tiempo en el relleno sanitario en el año 2003.

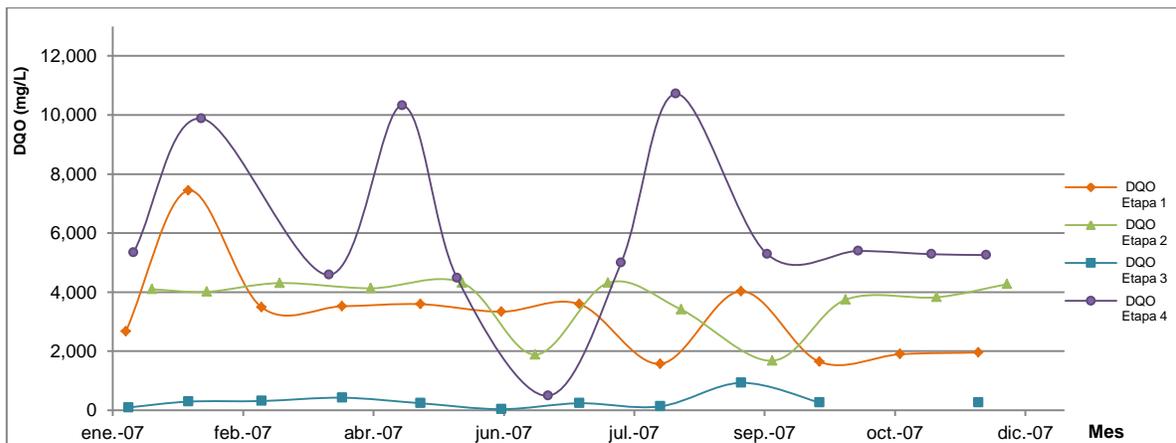


Figura 5-2. Tendencia de la DQO en función del tiempo en el relleno sanitario en el año 2007.

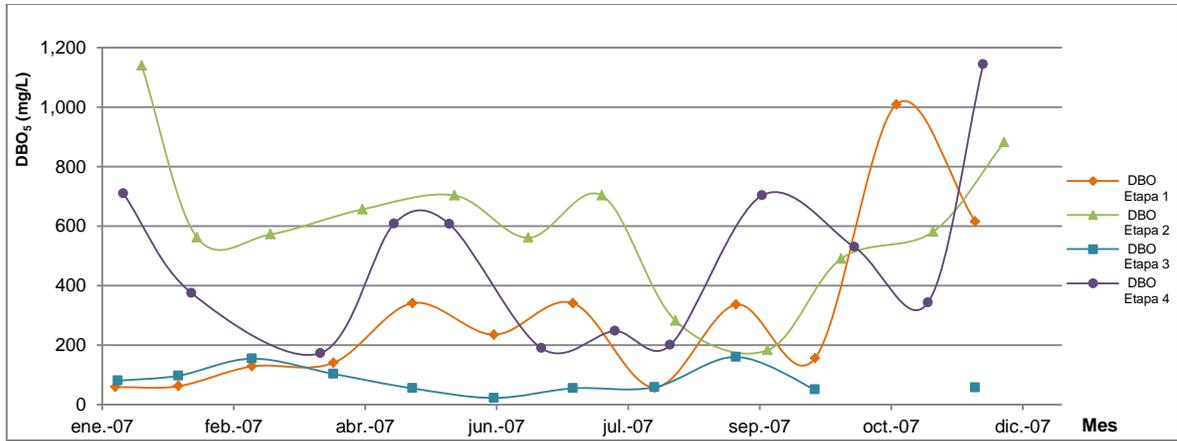


Figura 5-3. Tendencia de la DBQ₅ en función del tiempo en el relleno sanitario en el año 2007.

Se puede apreciar que existen condiciones o sustancias externas al lixiviado que le están dando propiedades del terreno, que son las características típicas del lago de Texcoco; como se mencionó anteriormente que aun cuando se encontraba en plena operación relleno sanitario el lixiviado generado, ya tenía un pH muy próximo al neutro.

Como se puede observar en la figura 5-4, las sales que se forman al evaporarse el lixiviado, son los compuestos que están aportando sus propiedades al lixiviado.



Figura 5-4. Sales que se generan en la superficie de la cubierta final de los desechos sólidos en la Etapa 1.

En los análisis efectuados en 2014 (Tabla 5-16 a la 5-20), se puede apreciar la misma tendencia de cada una de las propiedades que se analizaron, por lo tanto se puede apreciar que, con el paso del tiempo, el lixiviado, no ha cambiado en forma considerable sus propiedades.

En entrevistas a algunas personas que laboran en el propio relleno sanitario, manifiestan haber estado en contacto directo con el lixiviado e inclusive de haber ingerido accidentalmente este líquido sin tener consecuencia alguna para su salud, de igual forma comentaron que observaron a la fauna, presente en el relleno, haber tenido contacto directo con el lixiviado como los perros, de igual forma, algunas aves, que a la fecha continúan siendo parte de la fauna del relleno.

5.3. Resultados correspondientes al año 2014

Tabla 5-16. Análisis de lixiviado de la etapa 1 del RSBP de 2014.

Medición	Parámetros	Unidades	Septiembre 2014	Septiembre 2014	Septiembre 2014	Septiembre 2014
			Cárcamo 3	Cárcamo 6	Cárcamo 12	Cárcamo 15
Campo	pH		7.69	7.67	8.02	7.83
	Temperatura	°C	20.00	21.00	19.00	21.00
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	24,660.00	24,780.00	11,280.00	29,340.00
Laboratorio	Temperatura	°C	21.00	22.00	21.00	22.00
	Sólidos Sedimentables	mL/L	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	Sólidos Totales Totales	mg/L	13,220.00	14,910.00	7,150.00	14,250.00
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	1,730.00	2,190.00	1,230.00	2,440.00
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	11,490.00	12,720.00	5,920.00	11,810.00
	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	155.00	235.00	105.00	180.00
	Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	55.00	90.00	50.00	60.00
	Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	100.00	145.00	55.00	120.00
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	13,065.00	14,675.00	7,045.00	14,070.00
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	1,675.00	2,100.00	1,180.00	2,380.00
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	11,390.00	12,575.00	5,865.00	11,690.00
	Grasas y Aceites	mg/L	55.20	54.40	32.00	66.60
	DQO	mg O ₂ /L	2,352.94	2,627.45	784.31	3,137.25
	DBO ₅	mg/L	128.73	104.72	47.65	117.34
DBO ₅ /DQO		0.055	0.040	0.061	0.037	

Tabla 5-17. Análisis de lixiviado de la etapa 2 del RSBP de 2014

Medición	Parámetros	Unidades	Noviembre 2014	Noviembre 2014	Noviembre 2014	Noviembre 2014
			Pozo 13-B	Pozo 35	Pozo 35-B	Pozo Norte
Campo	pH		8.12	8.43	7.20	9.54
	Temperatura	°C	20.00	21.00	20.00	22.00
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	1,370.00	9,840.00	1,720.00	78,612.80
Laboratorio	Temperatura	°C	21.60	21.90	22.00	22.50
	Sólidos Sedimentables	mL/L	2.50	0.30	0.20	2.00
	Sólidos Totales Totales	mg/L	3,530.00	5,610.00	1,170.00	41,940.00
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	590.00	1,430.00	360.00	1,410.00
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	2,940.00	4,180.00	810.00	40,530.00
	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	1,035.00	145.00	55.00	870.00
	Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	110.00	65.00	30.00	190.00
	Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	925.00	80.00	25.00	680.00
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2,495.00	5,465.00	1,115.00	41,070.00
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	480.00	1,365.00	330.00	1,220.00
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	2,015.00	4,100.00	785.00	39,850.00
	Grasas y Aceites	mg/L	21.20	36.20	25.60	32.60
	DQO	mg O ₂ /L	754.72	1,981.13	471.70	2,075.47
	DBO ₅	mg/L	43.10	86.20	67.58	69.90
DBO ₅ /DQO		0.057	0.044	0.143	0.034	

Tabla 5-18. Análisis de lixiviado de la etapa 3 del RSBP de 2014.

Medición	Parámetros	Unidades	Noviembre 2014	Noviembre 2014	Noviembre 2014	Noviembre 2014
			Cárcamo 2	Cárcamo 6	Cárcamo 10	Cárcamo 18
campo	pH		7.65	8.60	7.98	7.79
	Temperatura	°C	19.00	19.00	18.00	20.00
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	1,670.00	21,612.00	3,650.00	26,612.80
Laboratorio	Temperatura	°C	21.00	21.40	20.80	21.50
	Sólidos Sedimentables	mL/L	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	Sólidos Totales Totales	mg/L	1,040.00	11,840.00	4,580.00	11,700.00
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	300.00	1,370.00	580.00	1,780.00
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	740.00	10,470.00	4,000.00	9,920.00
	Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	25.00	120.00	55.00	135.00
	Sólidos Suspendedos Volátiles	mg/L	10.00	35.00	10.00	45.00
	Sólidos Suspendedos Fijos	mg/L	15.00	85.00	45.00	90.00
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1,015.00	11,720.00	4,525.00	11,565.00
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	290.00	1,335.00	570.00	1,735.00
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	725.00	10,385.00	3,955.00	9,830.00
	Grasas y Aceites	mg/L	25.40	33.80	21.80	42.80
	DQO	mg O ₂ /L	245.28	1,339.62	358.49	2,000.00
	DBO ₅	mg/L	50.14	87.11	53.26	63.43
		DBO ₅ /DQO		0.204	0.065	0.149

Tabla 5-19. Análisis de lixiviado de la etapa 4 del RSBP de 2014.

Medición	Parámetros	Unidades	Octubre 2014	Octubre 2014	Octubre 2014	Octubre 2014
			SWM1	EM1	EM2	EM6
campo	pH		10.68	10.80	9.23	10.50
	Temperatura	°C	26.00	27.00	22.00	20.00
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	22,427.20	3,500.00	25,127.20	9,500.00
Laboratorio	Temperatura	°C	22.10	21.80	21.60	21.30
	Sólidos Sedimentables	mL/L	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	Sólidos Totales Totales	mg/L	12,330.00	2,550.00	12,300.00	5,870.00
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	3,020.00	610.00	3,370.00	1,840.00
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	9,310.00	1,940.00	8,930.00	4,030.00
	Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	220.00	50.00	190.00	145.00
	Sólidos Suspendedos Volátiles	mg/L	120.00	30.00	80.00	85.00
	Sólidos Suspendedos Fijos	mg/L	100.00	20.00	110.00	60.00
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	12,110.00	2,500.00	12,110.00	5,725.00
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	2,900.00	580.00	3,290.00	1,755.00
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	9,210.00	1,920.00	8,820.00	3,970.00
	Grasas y Aceites	mg/L	34.00	19.20	24.20	37.80
	DQO	mg O ₂ /L	4,684.68	540.54	4,684.68	2,612.61
	DBO ₅	mg/L	266.28	199.04	229.25	213.72
		DBO ₅ /DQO		0.057	0.368	0.049

Tabla 5-19-1. (Continuación) Análisis de lixiviado de la etapa 4 del RSBP de 2014.

Medición	Parámetros	Unidades	Octubre 2014				
			WM4	WM6	SM3	EM4	EM3
campo	pH		10.19	10.27	9.72	10.47	9.43
	Temperatura	°C	23.00	23.00	24.00	25.00	23.00
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	4,840.00	13,380.00	7,340.00	18,420.00	9,130.00
Laboratorio	Temperatura	°C	21.60	21.70	21.70	21.80	21.80
	Sólidos Sedimentables	mL/L	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
	Sólidos Totales Totales	mg/L	2,480.00	9,660.00	4,880.00	10,110.00	4,820.00
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	880.00	2,410.00	1,520.00	2,600.00	1,680.00
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	1,600.00	7,250.00	3,360.00	7,510.00	3,140.00
	Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	50.00	220.00	70.00	200.00	95.00
	Sólidos Suspendedos Volátiles	mg/L	45.00	95.00	65.00	85.00	50.00
	Sólidos Suspendedos Fijos	mg/L	5.00	125.00	5.00	115.00	45.00
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2,430.00	9,440.00	4,810.00	9,910.00	4,725.00
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	835.00	2,315.00	1,455.00	2,515.00	1,630.00
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	1,595.00	7,125.00	3,355.00	7,395.00	3,095.00
	Grasas y Aceites	mg/L	30.60	414.40	348.80	86.60	72.00
	DQO	mg O ₂ /L	1,891.89	3,513.51	2,072.07	4,054.05	2,162.16
	DBO ₅	mg/L	273.97	141.44	82.47	147.57	217.22
	DBO ₅ /DQO		0.145	0.040	0.040	0.036	0.100

Tabla 5-20. Análisis de lixiviado realizado en los laboratorios de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Mediciones	Parámetro	Unidad	Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3		Etapa 4	
Campo	Muestreo	--	19/05/14	31/07/14	19/05/14	31/07/14	19/05/14	31/07/14	19/05/14	31/07/14
	pH	--	8.73	8.13	8.01	8.10	7.79	7.83	8.08	8.03
	Temperatura	°C	18	21	23	23	22	22	21	24
	Cond. Eléctrica	mS/cm	2.82	1.27	3.89	4.16	3.85	3.64	4.96	4.70
Laboratorio	DQO (Método empleado NMX-AA-030-2-SCFI-2011)	mg/L	2,126	668	1,966	2,441	2,082	2,786	7,296	7,838
	DBO ₅ (Método empleado NMX-AA-028-SCFI-2011)	mg/L	35	37	79	202	76	109	250	370

5.4. Gráficas de los resultados en los parámetros evaluados

De la figura 5-5 a la 5-32 se muestran las gráficas correspondientes los parámetros pH, DQO, DBO₅, G y A, SVT, y SST, evaluados para cada una de las cuatro etapas que conforman el relleno, para el periodo de análisis de 1996 a 2014.

Las gráficas, en algunos periodos, no presentan datos, esto es debido, como se mencionó anteriormente, a que algunas veces no se podía el acceder al punto de muestreo, debido a que los caminos se encontraban intransitables o en ocasiones por las maniobras de operación del relleno. Principalmente en la Etapa 4, se hallaron puntos de cuando en esta zona se iniciaba la operación, lo que originó que se obtuvieran puntos de monitoreo muestreados por espacios cortos de tiempo.

En cada una de las propiedades graficadas, se muestra de forma esquemática una tendencia lineal; esto es debido a la gran dispersión de datos, que no permitió realizar un análisis estadístico por algún modelo matemático tradicional para poder predecir la tendencia.

Una evaluación importante para observar el grado de estabilización de un relleno es determinar la relación DBO₅/DQO, que demuestra la biodegradabilidad de la materia orgánica en el lixiviado.

Pero para cada una de las etapas en este relleno, la relación es tan variada que no se comporta como los datos bibliográficos^[2], en las gráficas el comportamiento es errático debido a la alta dispersión de los datos en el periodo de estudio (2006 a 2014), se realizan los cálculos para cada uno de los pares que corresponden a la misma fecha y que a continuación se muestran en las gráficas 5-11, 5-18, 5-25 y 5-32, donde se puede apreciar que la tendencia es a ir disminuyendo con valores debajo de 0.2 para las etapas 1, 2 y 3, pero para la etapa 4 se puede apreciar que se mantiene por encima de 0.3, considerando que en los últimos años se tienen pocos muestreos.

En particular para el pH como se observa en la figura 5-5, que desde octubre del 2008 hasta marzo de 2009 se tuvo una afectación en el comportamiento de esta propiedad (pH), presumiblemente por el efecto de las lluvias.

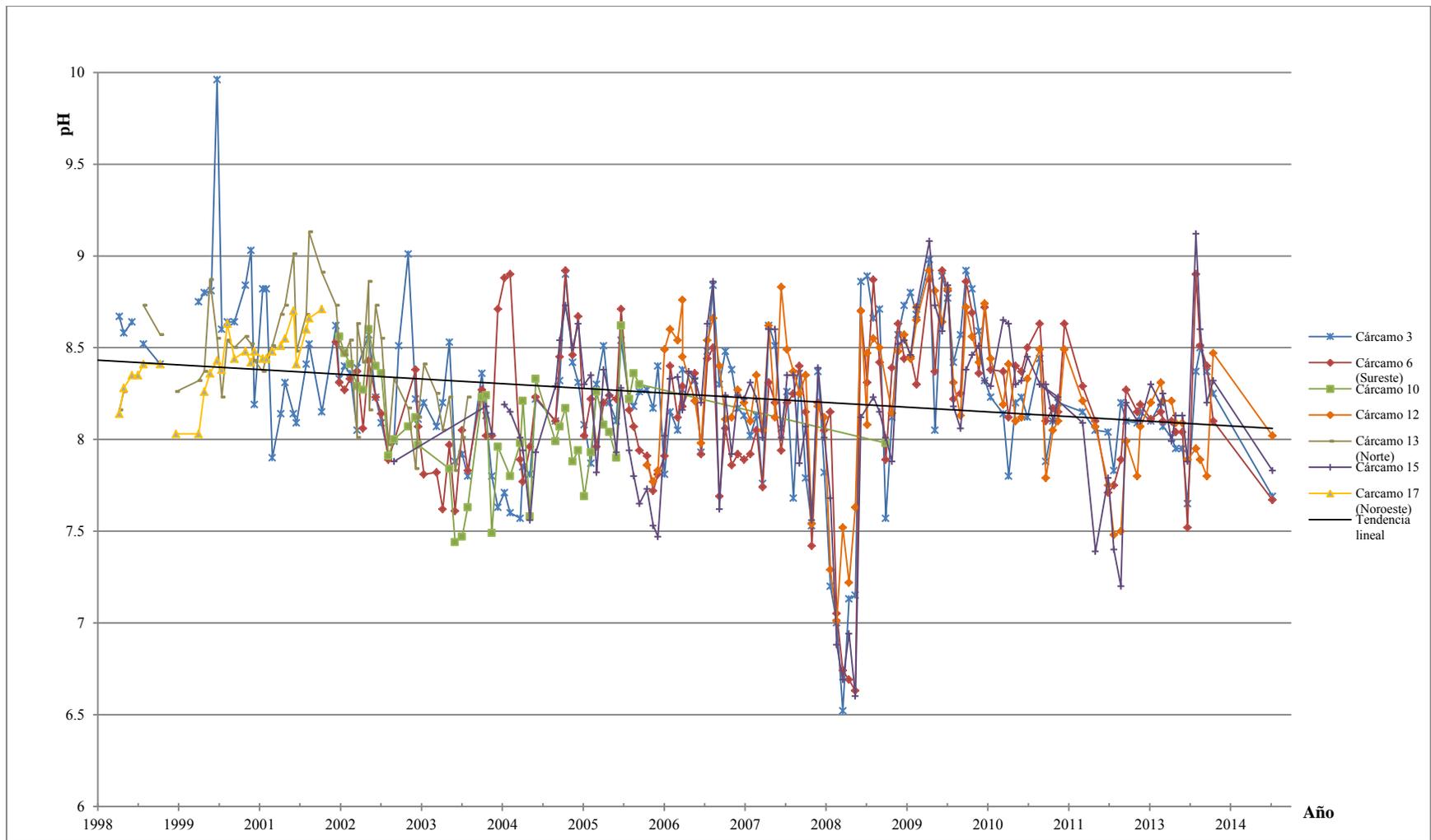


Figura 5-5. Comportamiento del pH en el lixiviado de la Etapa 1.

En la figura 5-6, se puede apreciar la tendencia de la demanda química de oxígeno la cual fue disminuyendo en función del tiempo.

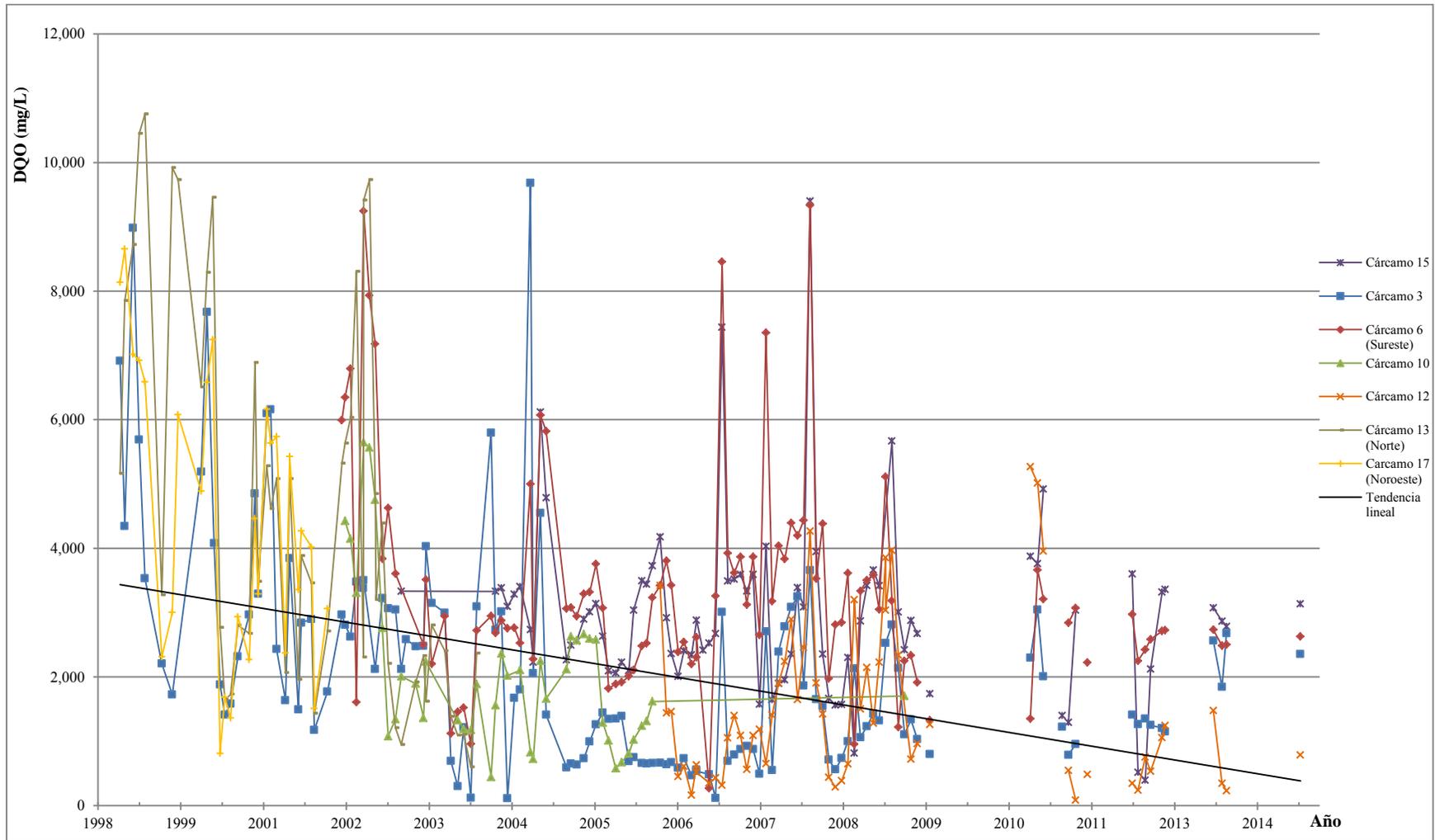


Figura 5-6. Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 1.

Se aprecia en la figura 5-7, la tendencia de la demanda bioquímica de oxígeno a ir disminuyendo en función del tiempo, se puede apreciar que entre septiembre de 2007 y agosto de 2009 se presentaron interferencias las cuales incrementaron los valores.

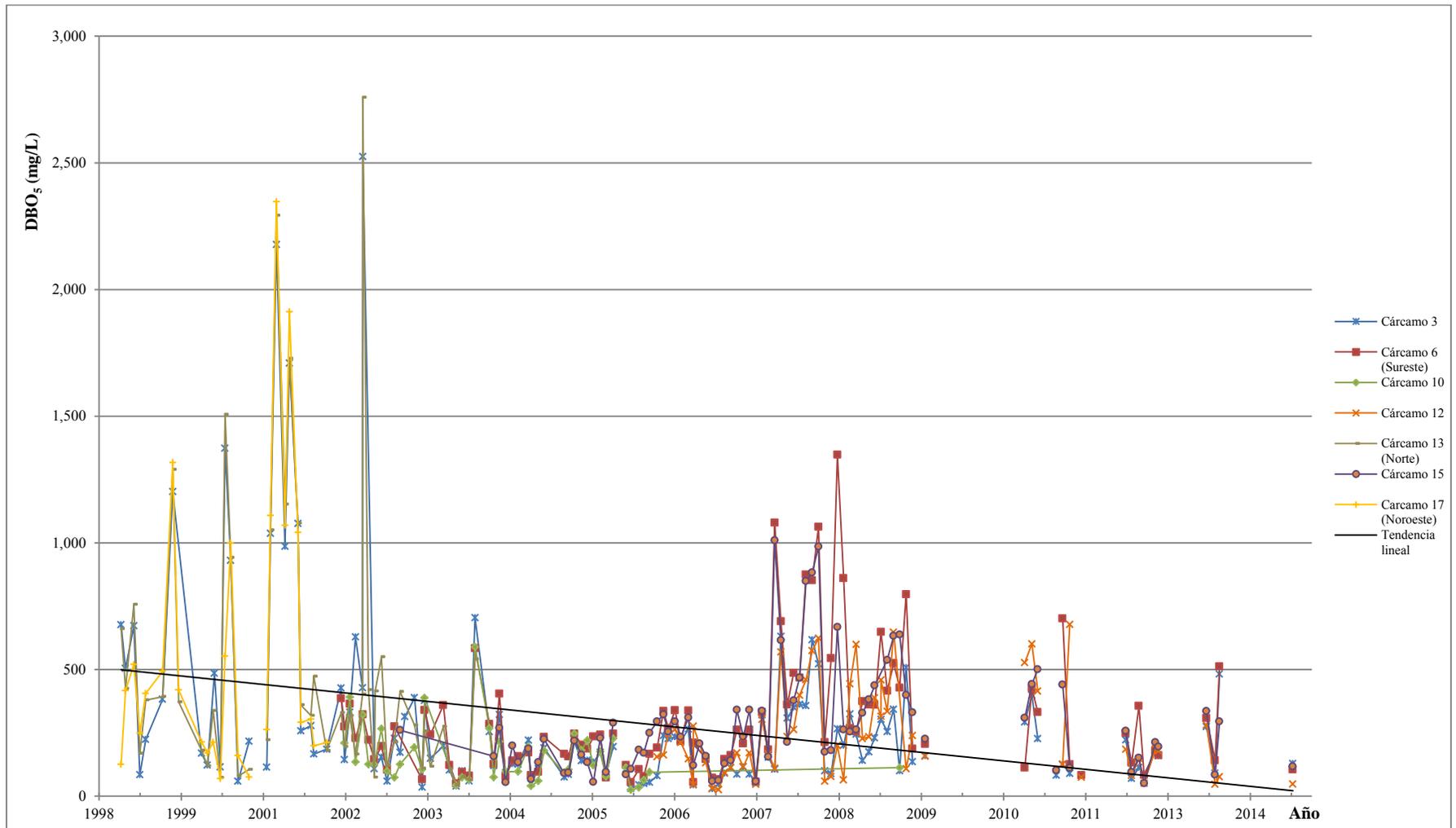


Figura 5-7. Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 1.

Se puede apreciar en la figura 5-8, el comportamiento de las grasas y los aceites, que aunque existen pocos datos después del año 2009, y con las variaciones mensuales, debido a las condiciones ambientales, la tendencia es a ir disminuyendo.

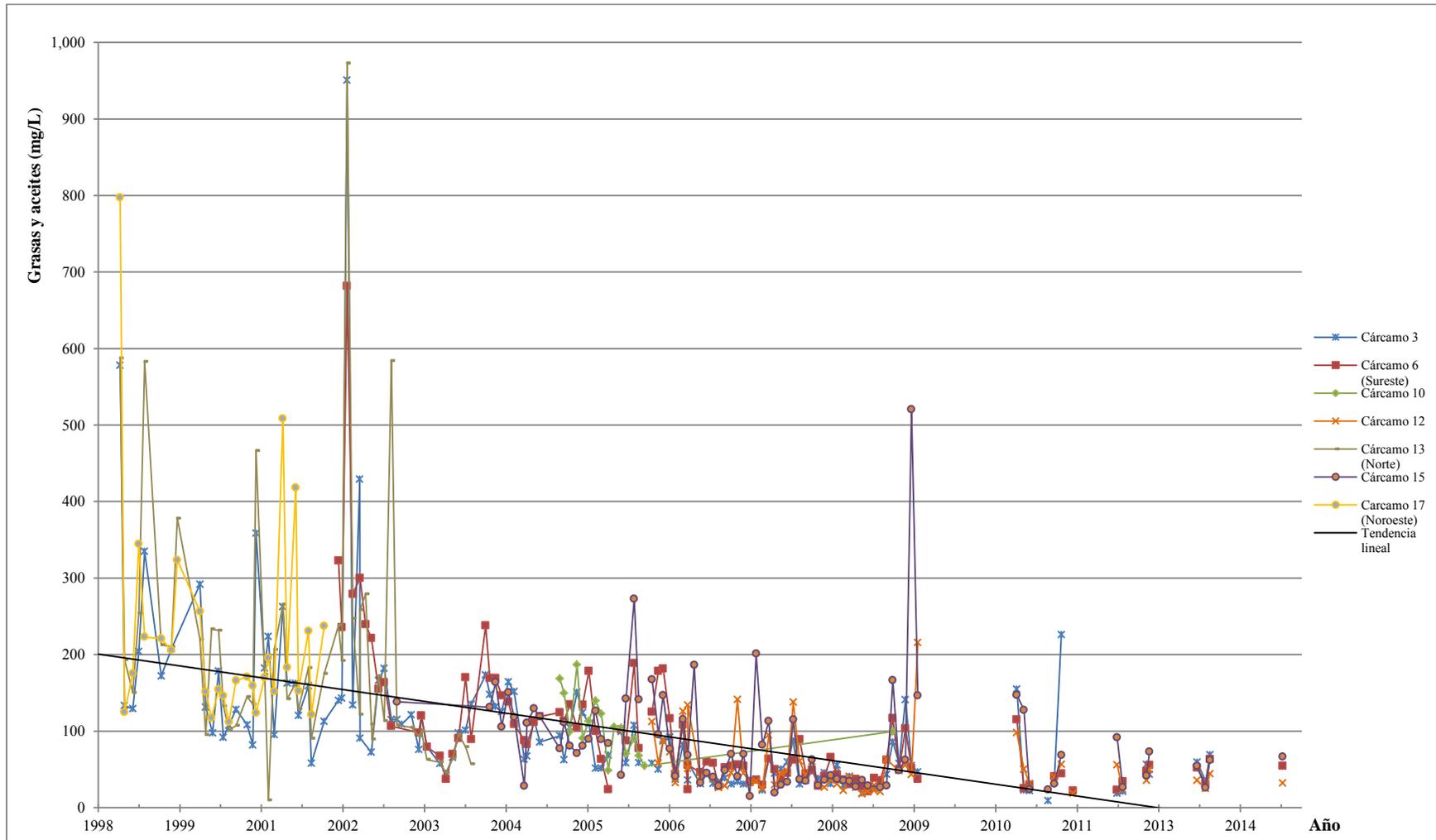


Figura 5-8. Comportamiento de las grasas y los aceites en el lixiviado de la Etapa 1.

En la figura 5-9 se observa el comportamiento de los sólidos totales volátiles que aunque se tienen pocos datos de 1996 al año de 1999 y en consecuencia la dispersión es notoria, de manera general la tendencia es a ir disminuyendo, aunque en el cárcamo 6 se aprecia que tiende a ser constante.

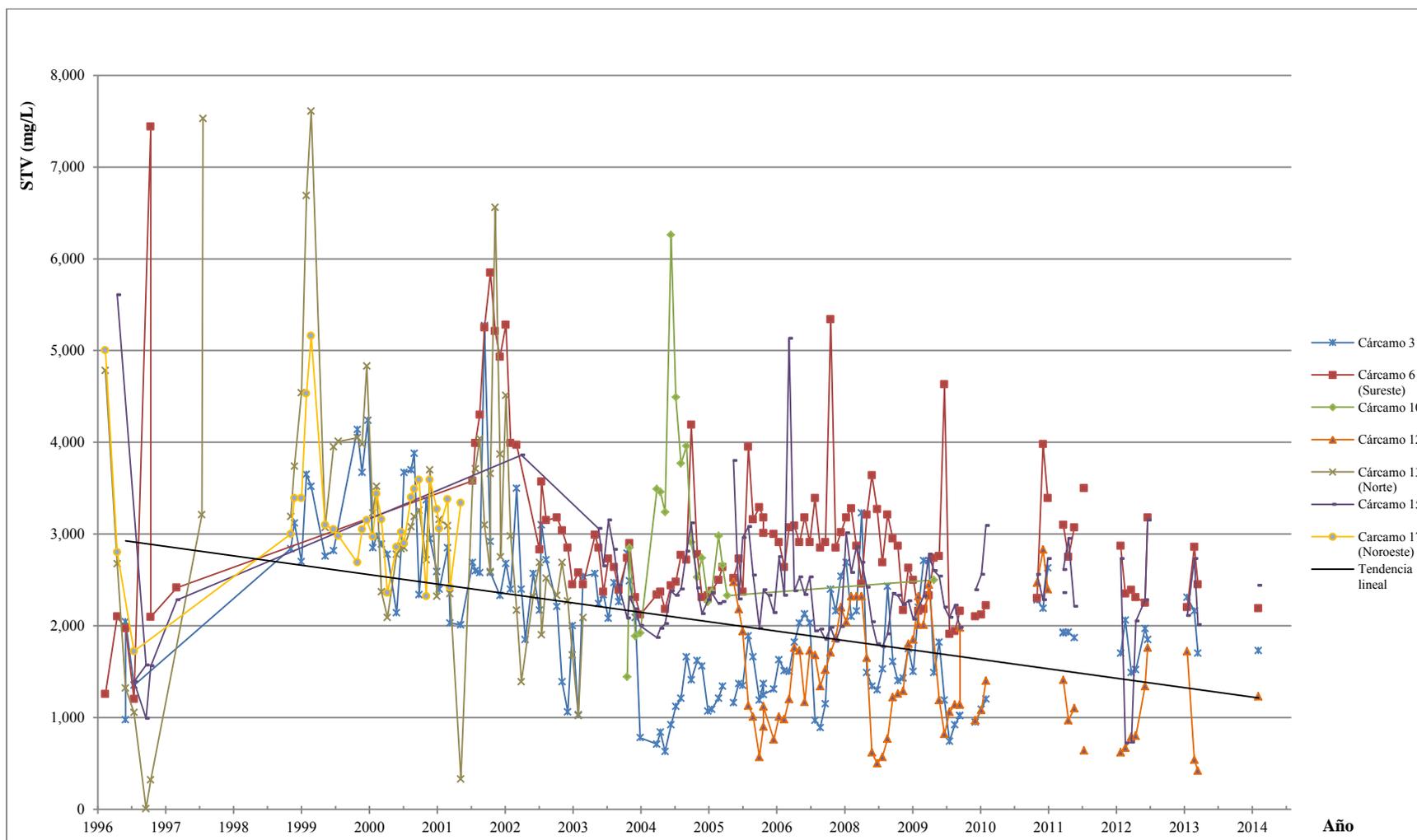


Figura 5-9. Comportamiento de los sólidos totales volátiles en el lixiviado de la Etapa 1.

La figura 5-10 muestra los sólidos suspendidos totales, aunque en forma mínima pero presentan una ligera tendencia dispersa para cada uno de los puntos muestreados, pero con la misma tendencia.

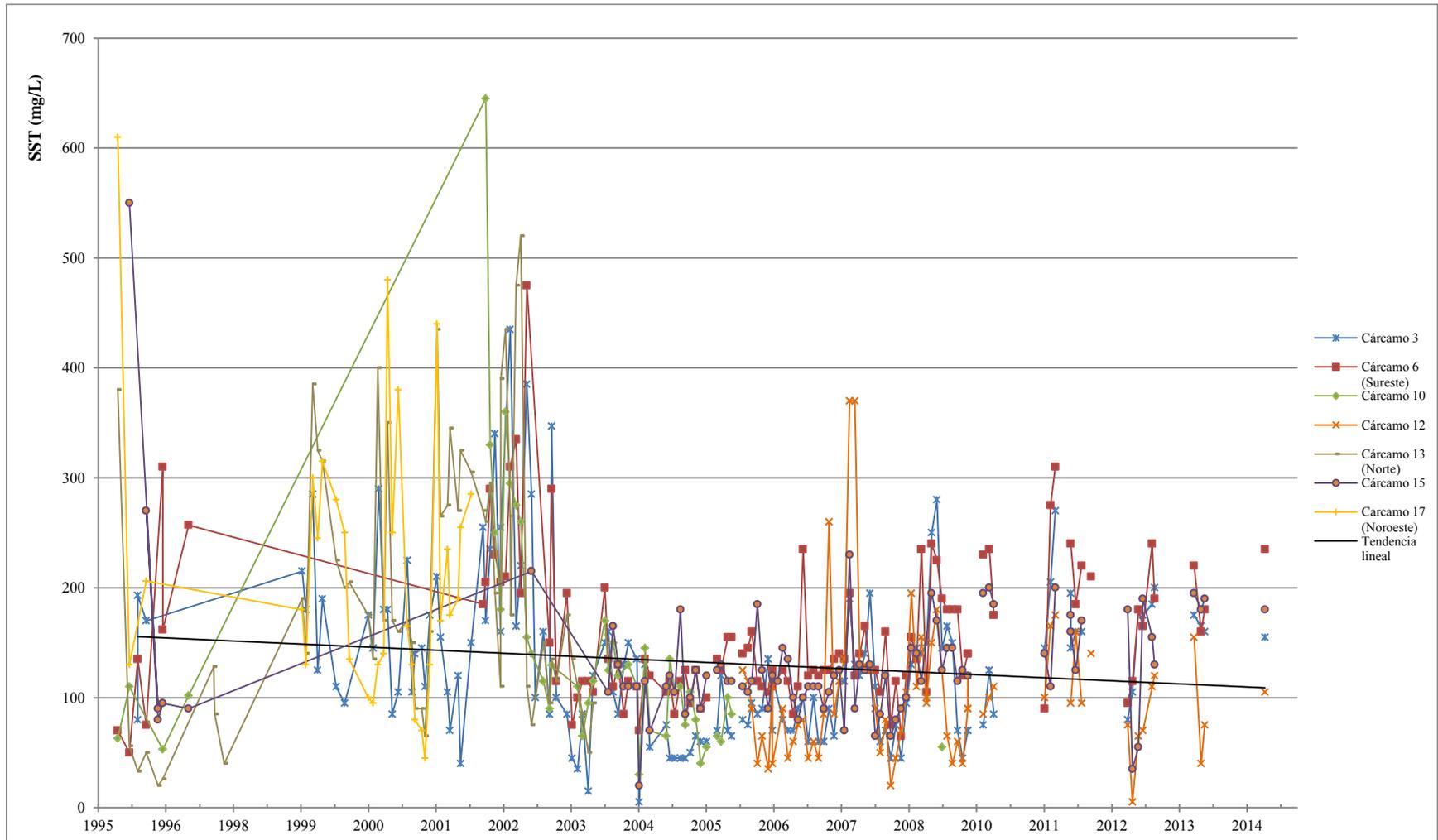


Figura 5-10. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el lixiviado de la Etapa 1.

La figura 5-11 muestra la relación DBO_5/DQO , donde se puede apreciar el cambio que ha tenido con respecto al tiempo, llegando a valores por debajo de 0.2 en algunos puntos de monitoreo, lo que indica la baja biodegradabilidad.

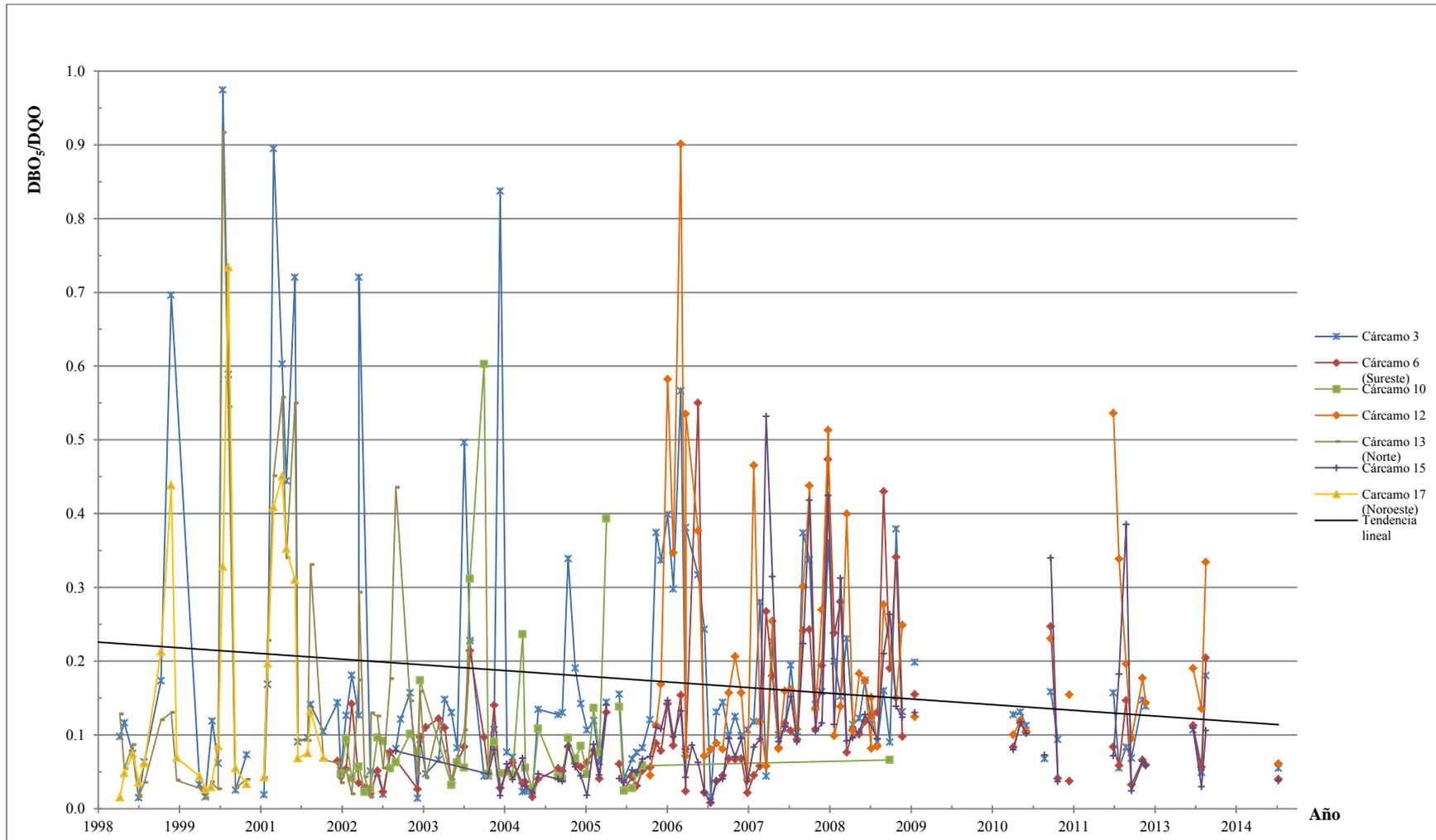


Figura 5-11. Comportamiento de la Relación DBO_5/DQO en el lixiviado de la Etapa 1.

En la figura 5-12, se aprecia que existe disparidad en el comportamiento del pH en los puntos monitoreados como en el punto norte que tiene valores promedio de 8.5, y también se tiene puntos con valores promedio de 7.5.

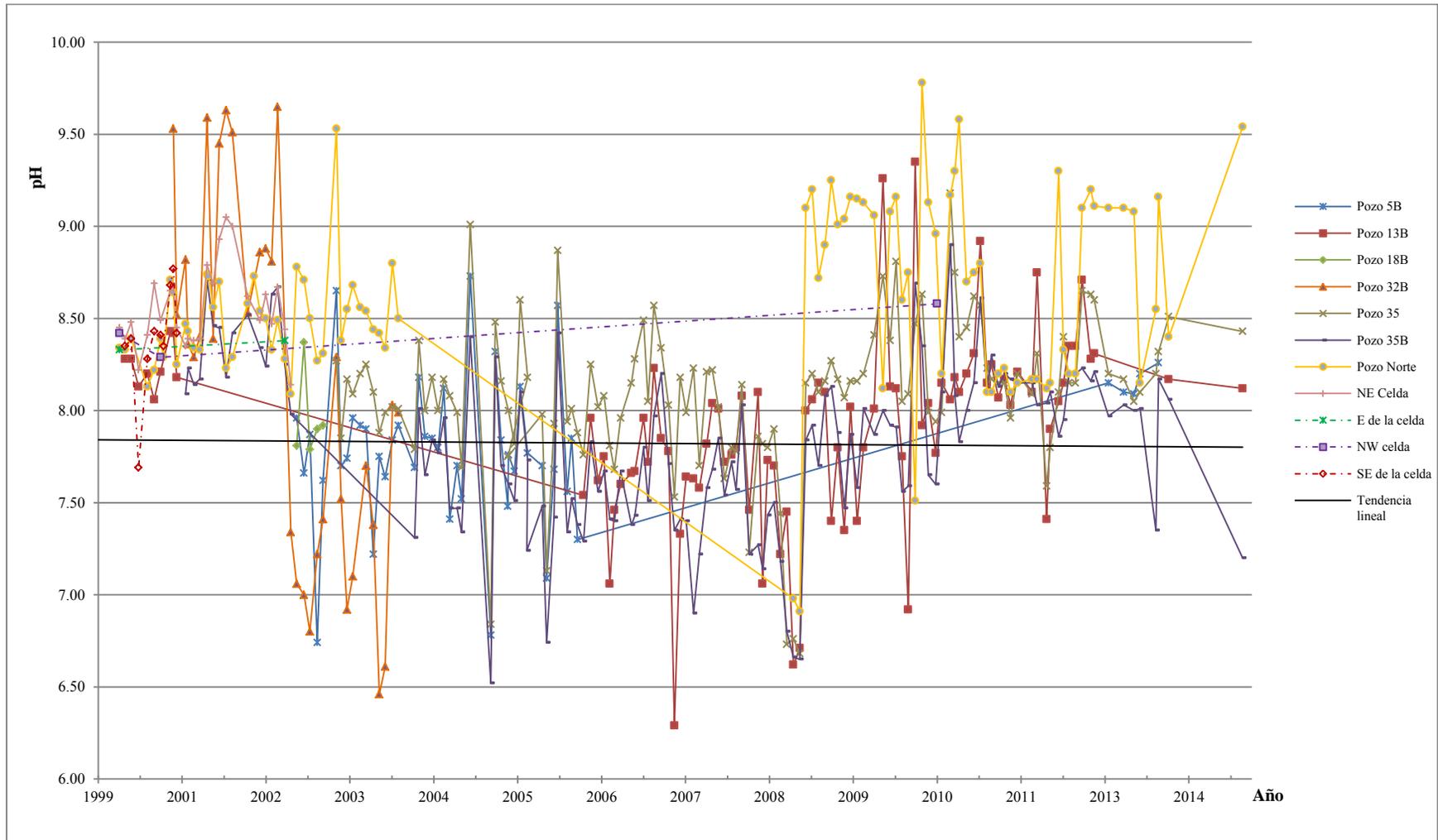


Figura 5-12. Comportamiento del pH en el lixiviado en el lixiviado de la Etapa 2.

En la figura 5-13, se aprecia que la demanda química de oxígeno presenta una tendencia a ir disminuyendo para todo el periodo, pero desde el año de 2002 al 2014 y conserva de manera global el mismo comportamiento, en forma más o menos constante.

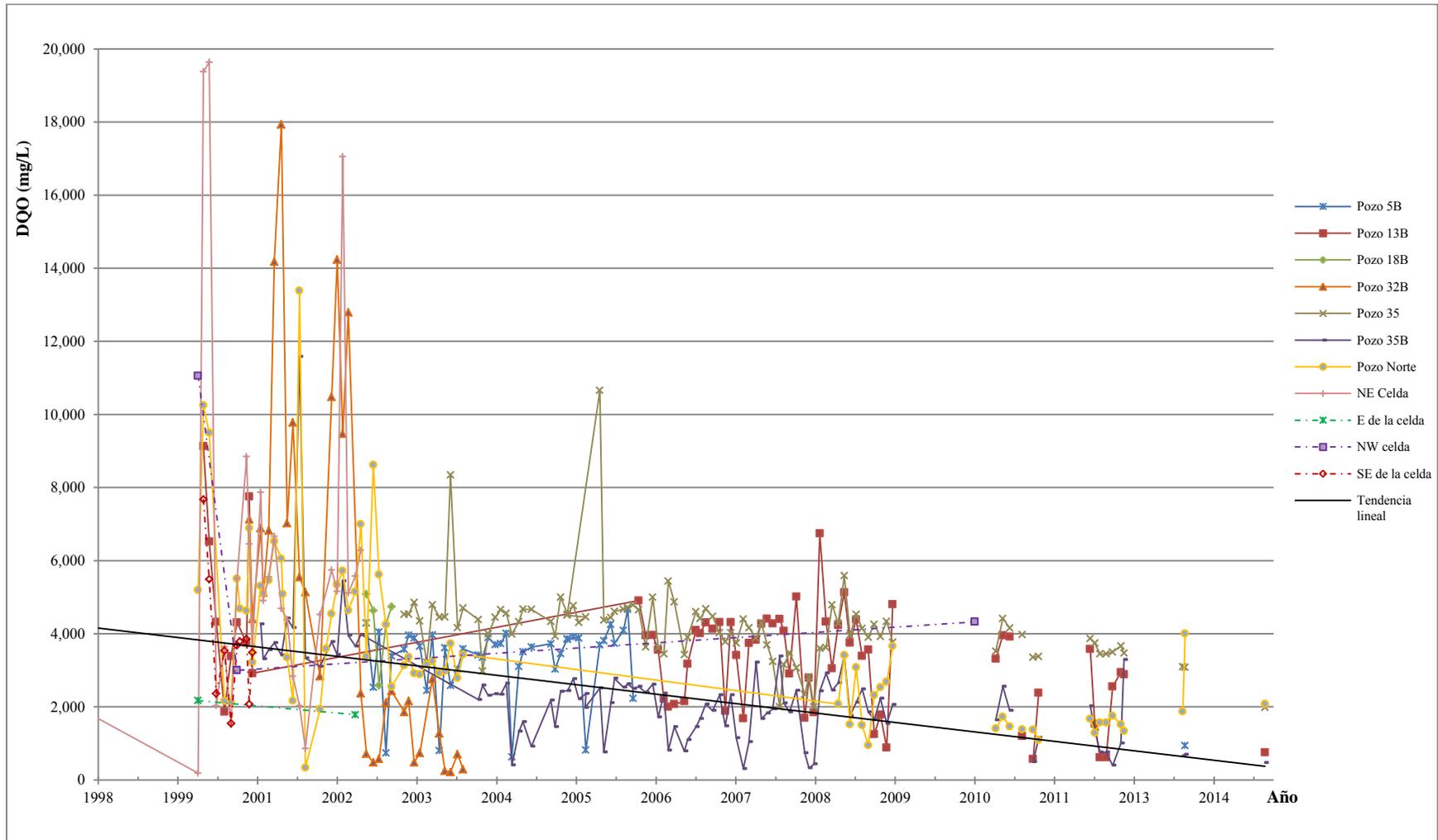


Figura 5-13. Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 2.

En la figura 5-14, la demanda bioquímica de oxígeno, aunque de manera general presenta una tendencia a disminuir, se puede apreciar la forma gaussiana que presenta desde mediados de 2003 a finales de 2009.

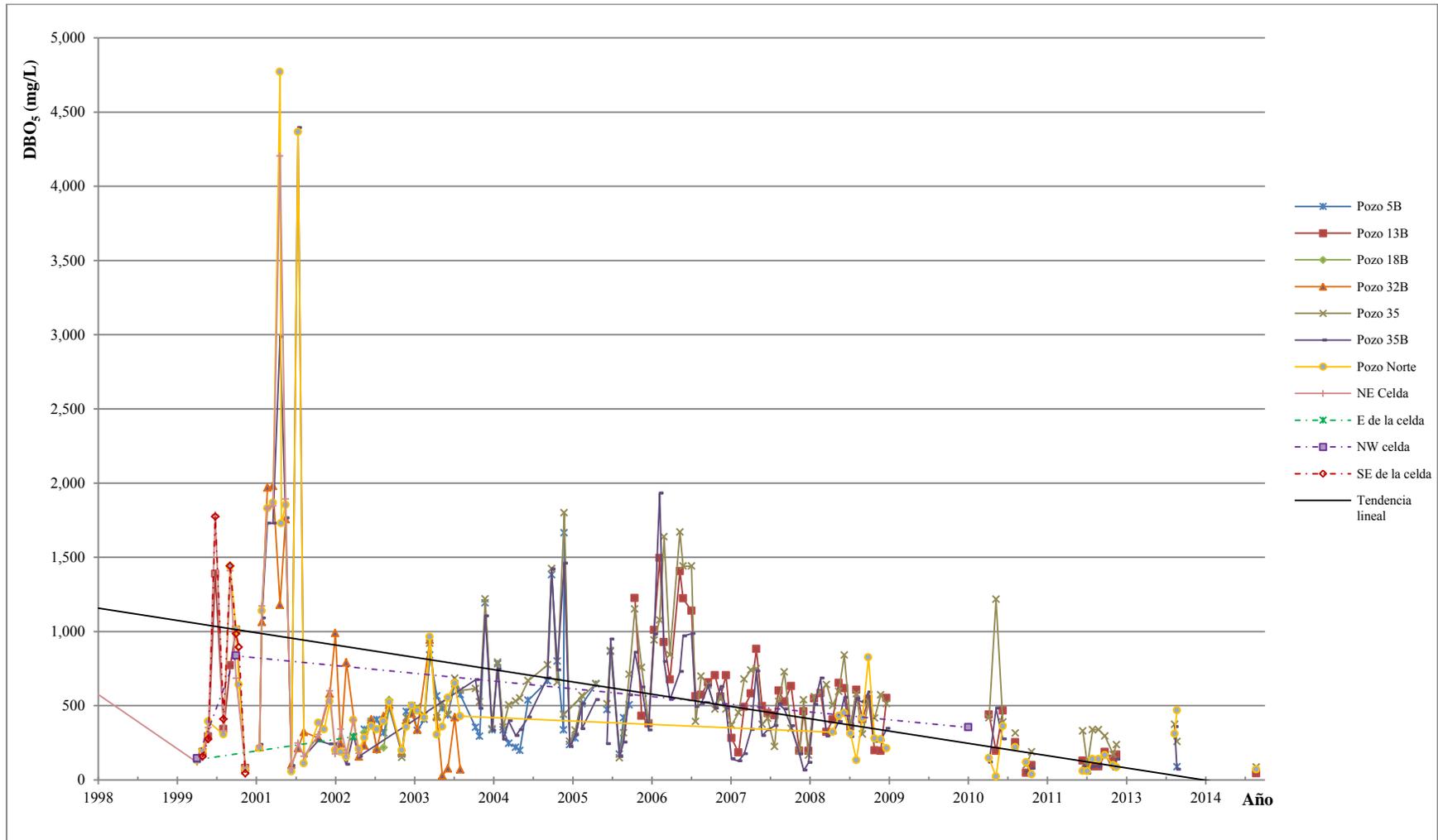


Figura 5-14. Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 2.

En la figura 5-15, se observa el comportamiento de las grasas y aceites, con los pocos puntos monitoreados después de 2009 se puede apreciar una tendencia a ir disminuyendo.

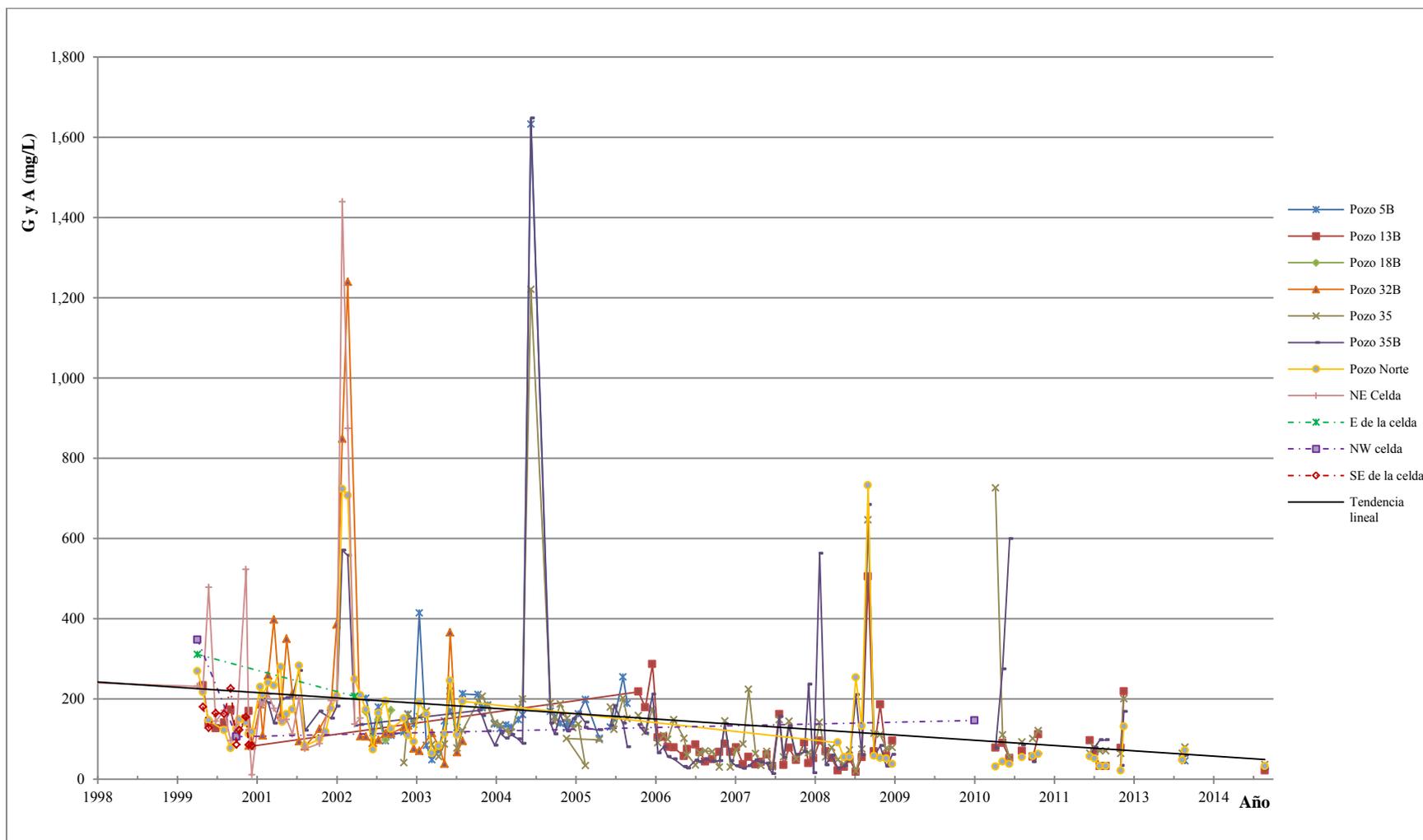


Figura 5-15. Comportamiento de las grasas y los aceites en el lixiviado de la Etapa 2.

En la figura 5-16, se observa los datos de los sólidos totales volátiles, con pocos datos en el periodo de 1996 al año 200, se puede apreciar que antes del año de 2002 se tenía una gran dispersión en el comportamiento y posterior a este periodo la tendencia es a ir disminuyendo.

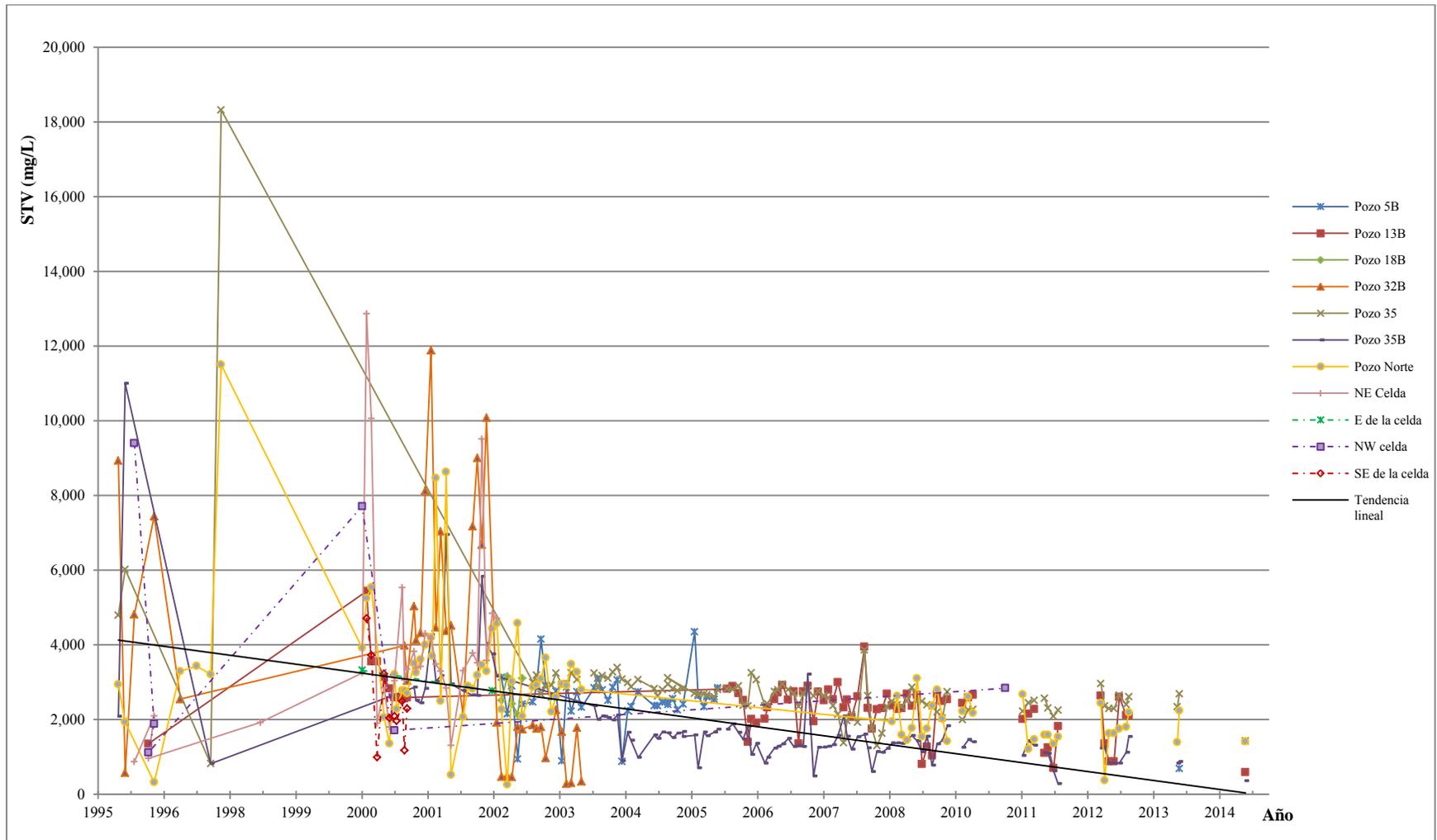


Figura 5-16. Comportamiento de los sólidos totales volátiles en el lixiviado de la Etapa 2.

En la figura 5-17, se observan los datos de los sólidos suspendidos totales y claramente se puede apreciar que en el punto norte se presenta un valor por encima de los demás puntos que se comportan de manera constante en valores muy bajos.

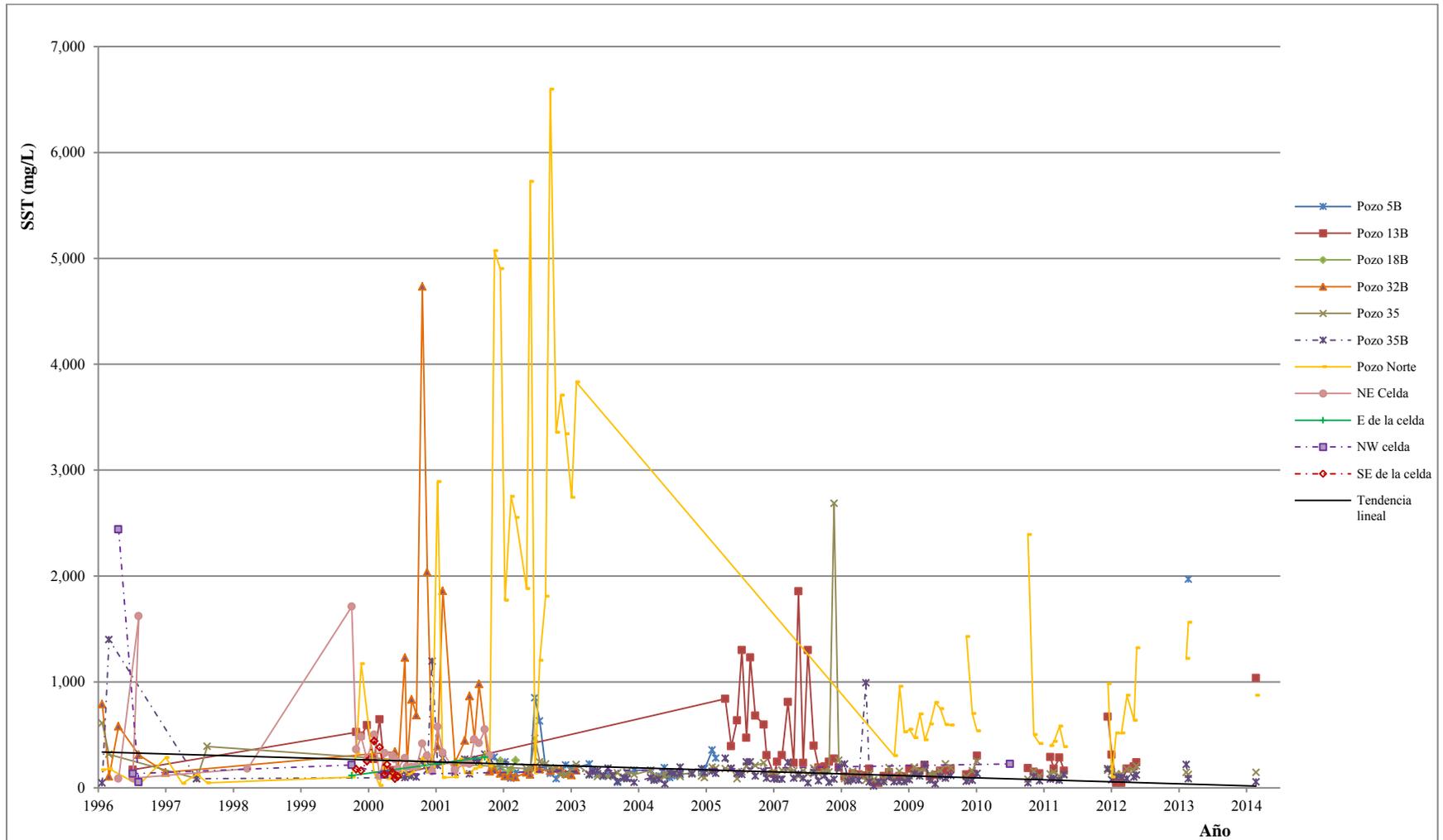


Figura 5-17. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el lixiviado de la Etapa 2.

La figura 5-18 muestra la Relación DBO_5/DQO , donde se puede apreciar el cambio que ha tenido con respecto al tiempo posterior al año de 2007, llegando a valores por debajo de 0.1 en algunos puntos de monitoreo, lo que indica la baja biodegradabilidad.

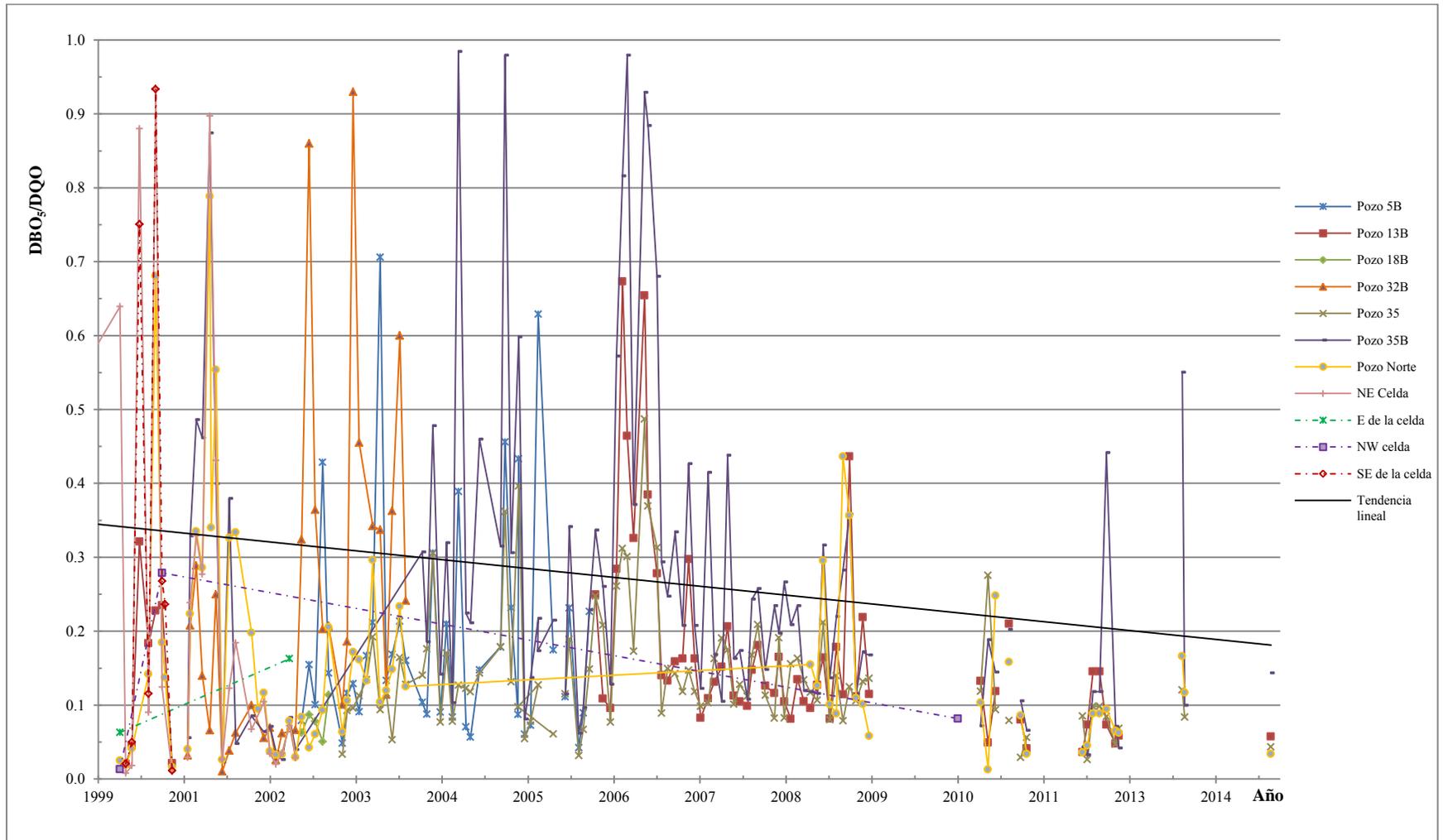


Figura 5-18. Comportamiento de la Relación DBO_5/DQO en el lixiviado de la Etapa 2.

En la figura 5-19, se puede apreciar el comportamiento del pH, que desde mediados de 2008 y hasta principios de 2009 se tuvo una influencia, que se podría suponer sería efecto de las lluvias y aunque a menor escala pero también se presenta a finales de 2003 y principios de 2004, con una ligera tendencia general a disminuir.

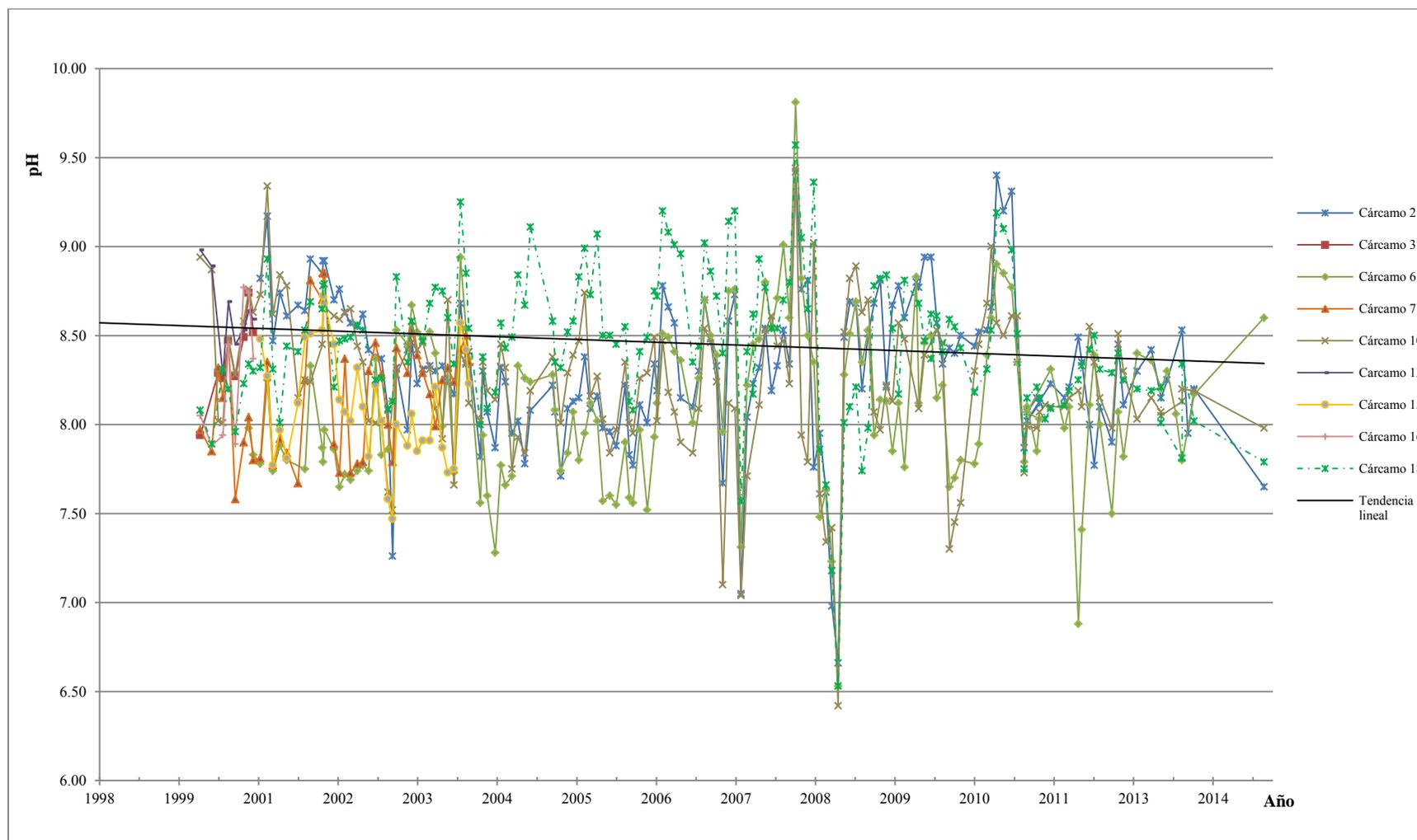


Figura 5-19. Comportamiento del pH en el lixiviado de la Etapa 3.

En la figura 5-20, se observa la tendencia de la demanda química de oxígeno, que en la parte oeste y la sur de la celda se comportan con la misma tendencia pero con un diferencial constante a través del tiempo, lo cual hace suponer que existen desechos que marcan una diferencia considerable.

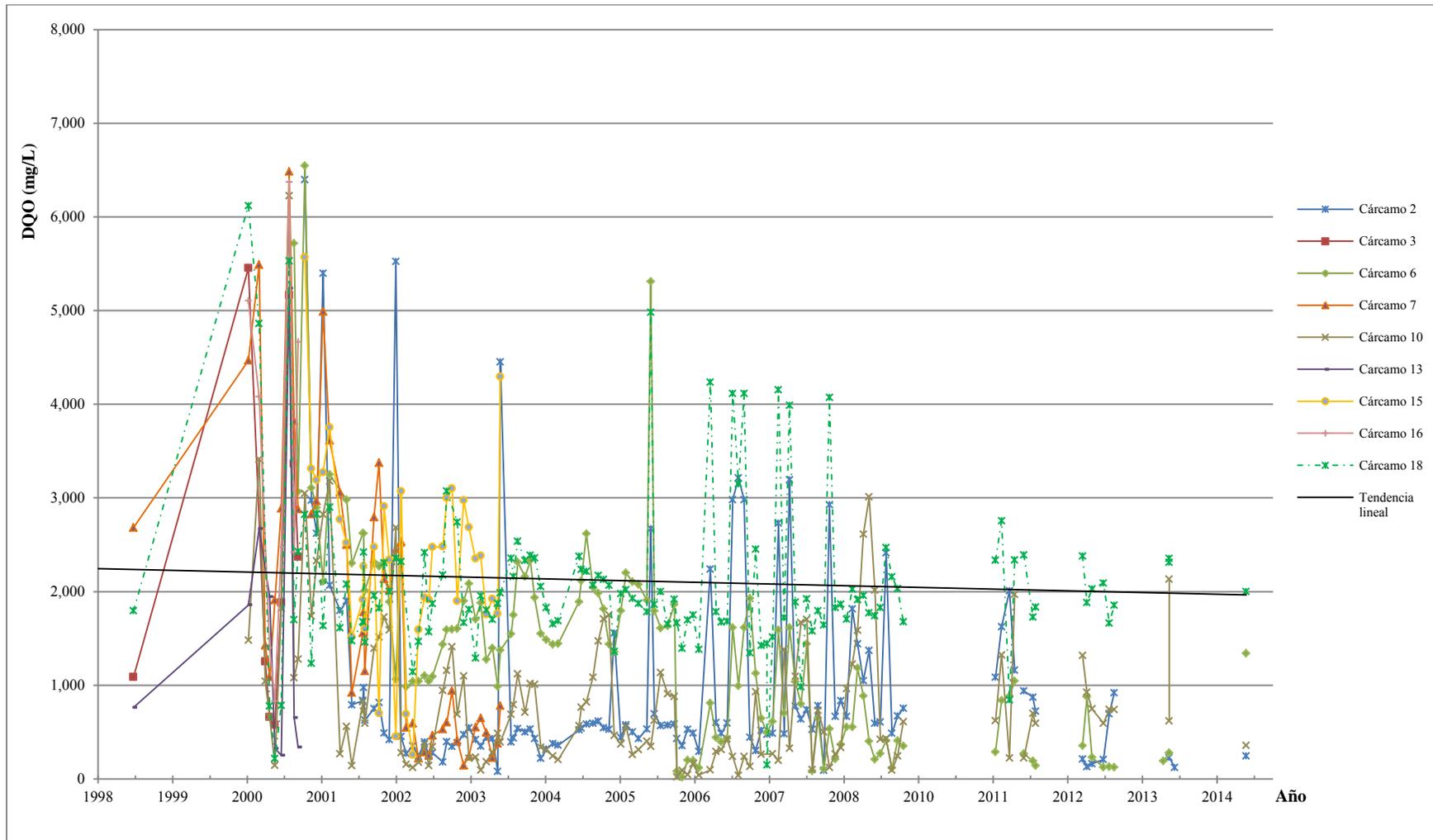


Figura 5-20. Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 3.

En la gráfica 5-21, se aprecia la tendencia de la demanda bioquímica de oxígeno, que en forma mínima va disminuyendo, a pesar de que se tienen pocos datos posteriores a 2010, esta tendencia se puede constatar con los puntos finales de la gráfica (muestreo de noviembre de 2014).

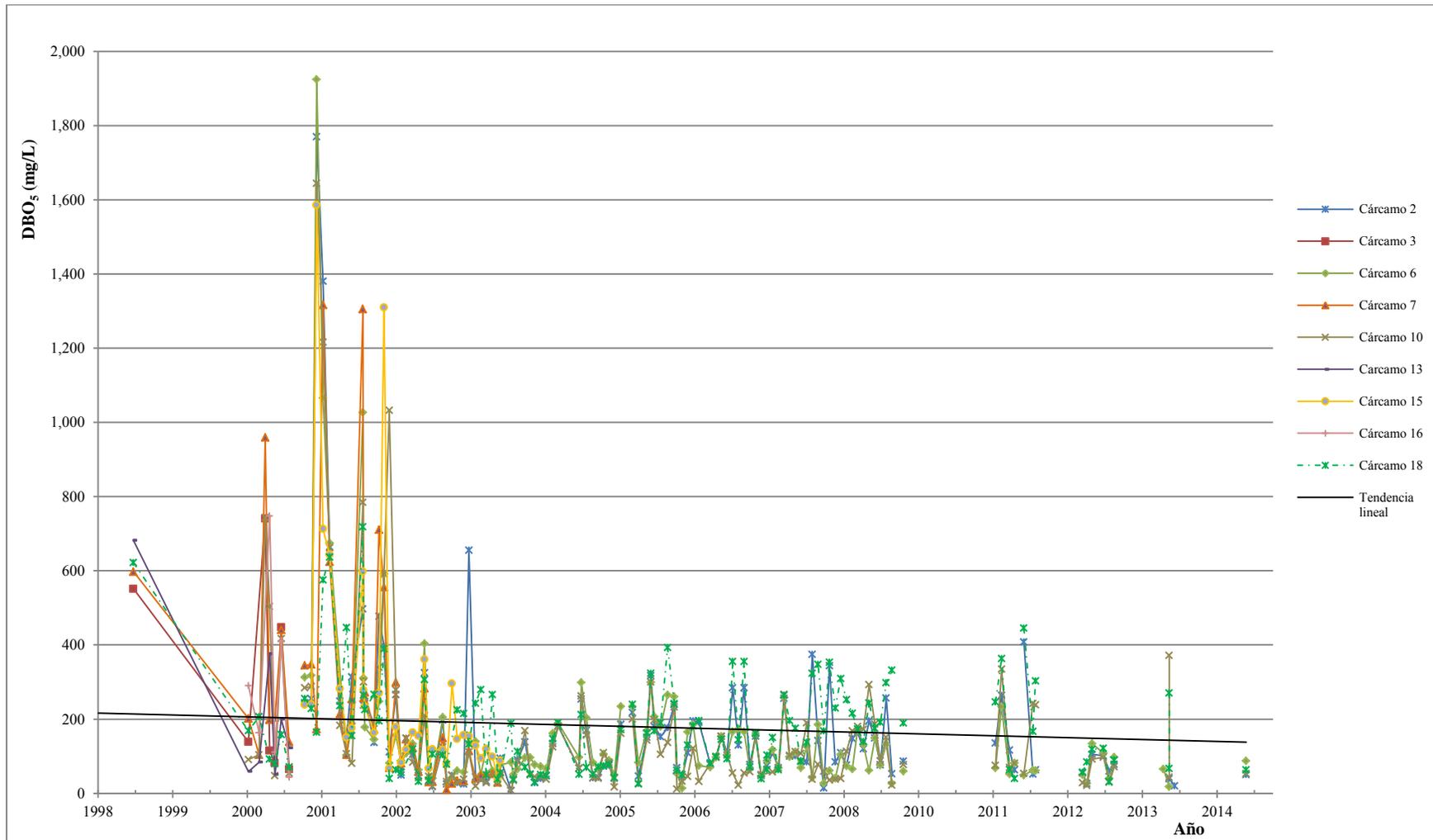


Figura 5-21. Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 3.

En la figura 5-22, se observa el comportamiento de las grasas y los aceites que en el cárcamo 18 existen materiales que hacen fluctuar los valores, aunque de manera general tiene una tendencia a disminuir, pero en este punto prevalece el comportamiento más o menos constante, pero en el punto final que corresponde al muestreo de noviembre de 2014 se aprecia una tendencia a disminuir.

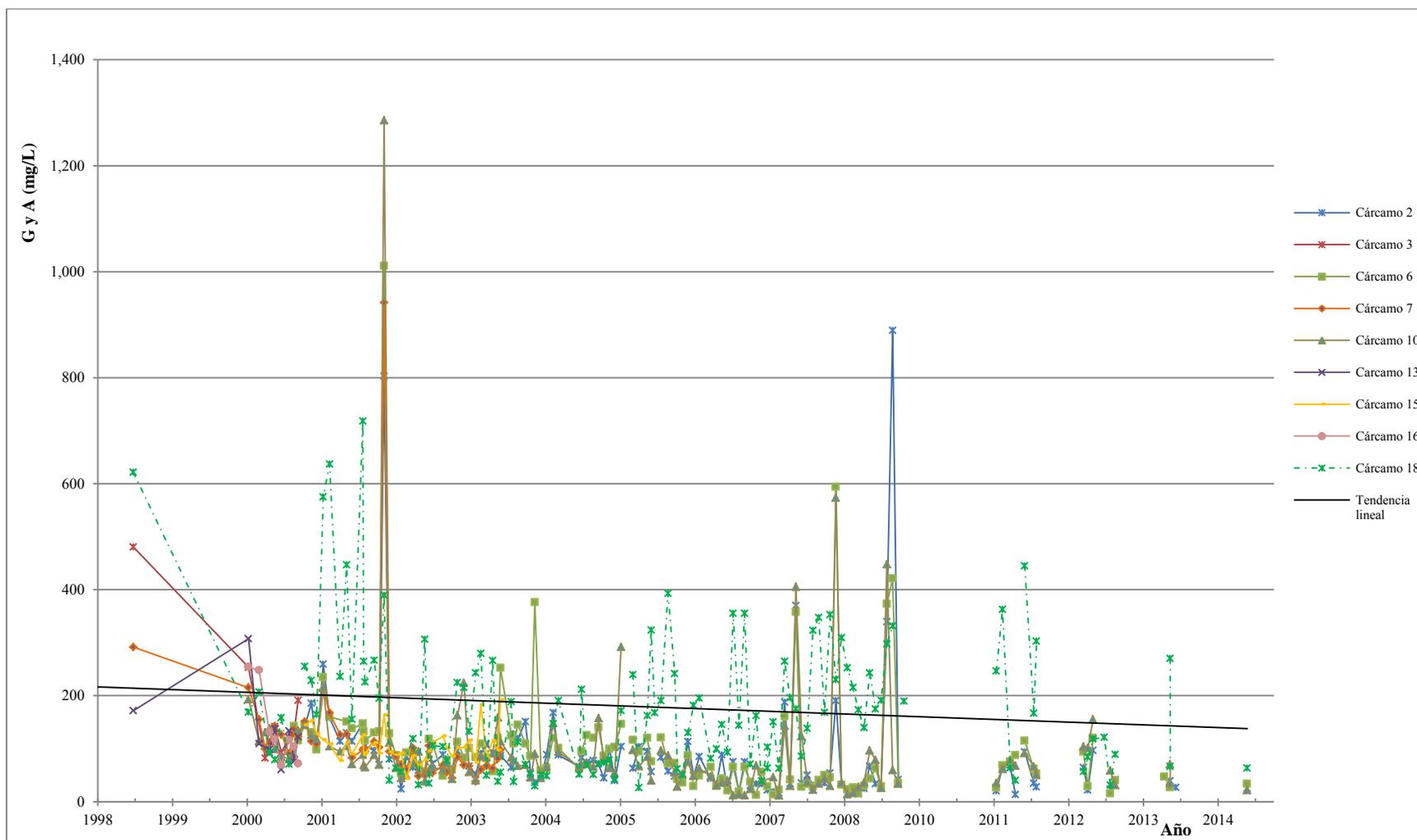


Figura 5-22. Comportamiento de las grasas y los aceites en el lixiviado de la Etapa 3.

En la figura 5-23 se observa el comportamiento de los sólidos totales volátiles que además, se puede apreciar que en la parte oeste y norte (cárcamo 18 y 13), los valores son mayores que en la parte sur (cárcamo 2 y 6), esto demuestra que se tiene materiales que a pesar del tiempo han permanecido sin muchos cambios. En el periodo de 1996 al año 2000 se tienen pocos muestreos, motivo por el cual se tiene dispersión de puntos.

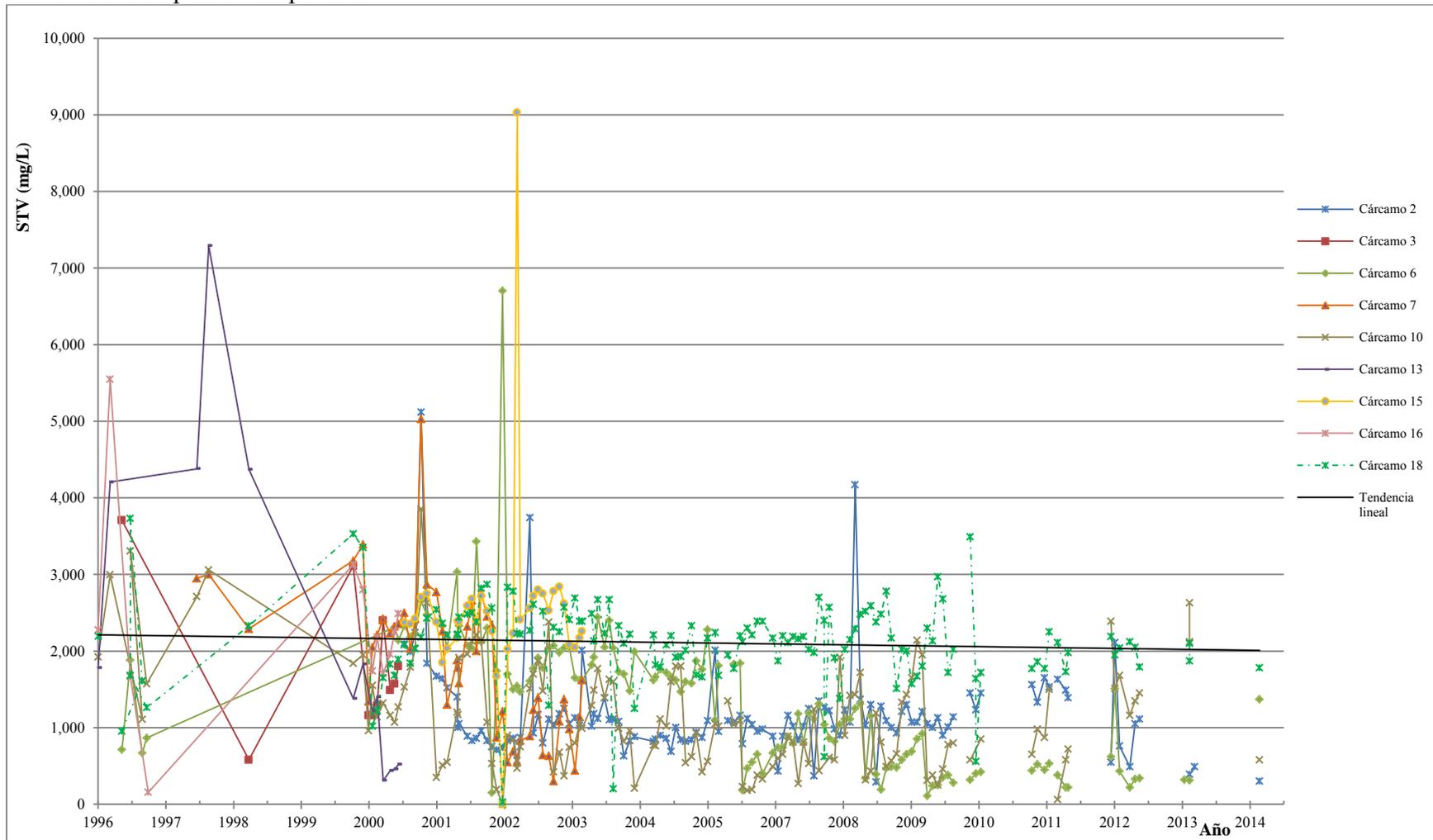


Figura 5-23. Comportamiento de los sólidos totales volátiles en el lixiviado de la Etapa 3.

En la figura 5-24 se observa el comportamiento de los sólidos suspendidos totales que además se aprecia que existe una tendencia a aumentar principalmente en la parte del cárcamo 18, puede deberse a que existen materiales que con el paso del tiempo se van disolviendo en este punto. En el periodo de 1996 al año 2000 se tienen pocos muestreos, motivo por el cual se tiene dispersión de puntos.

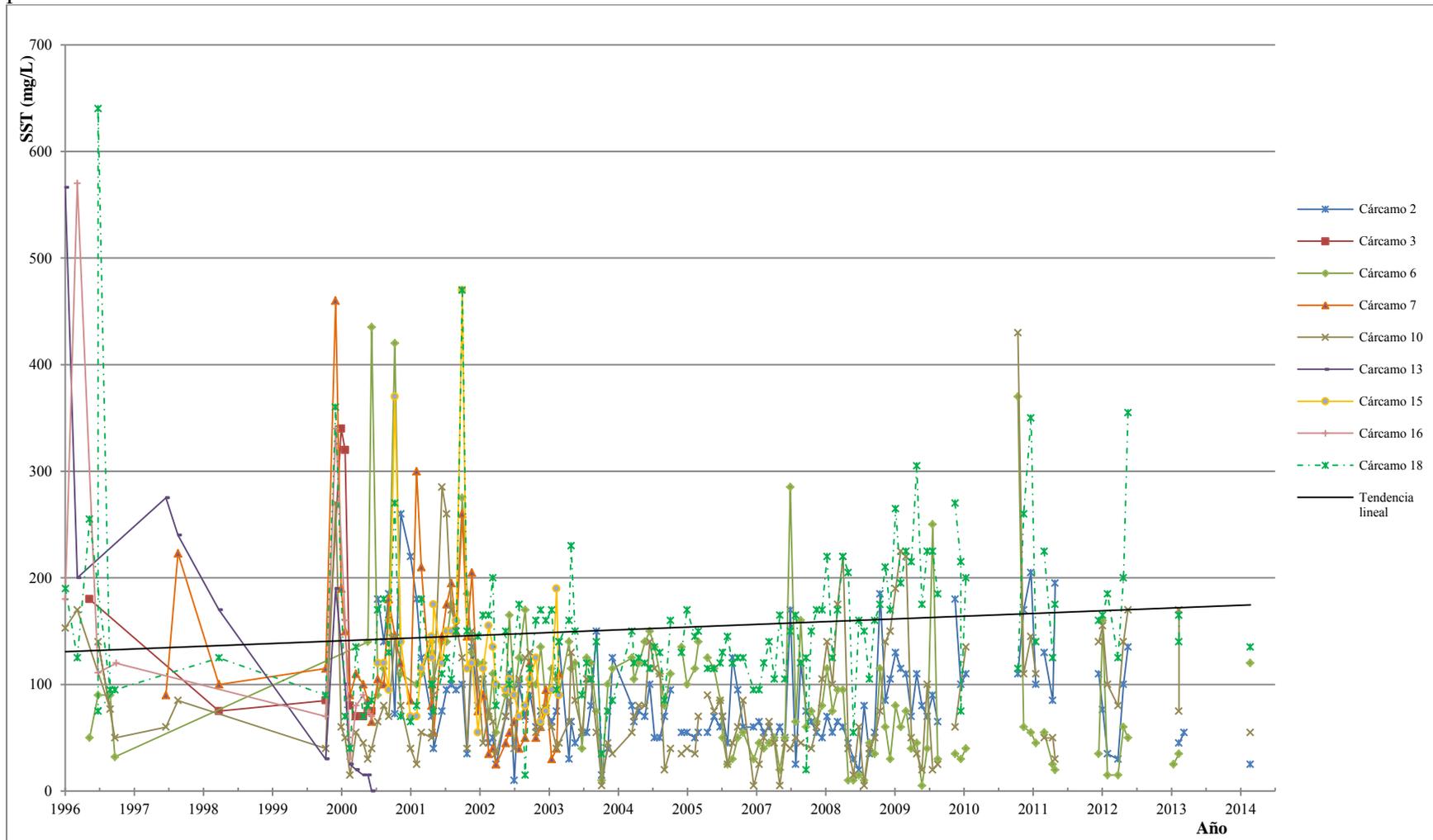


Figura 5-24. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el lixiviado de la Etapa 3.

La figura 5-25 muestra la Relación DBO_5/DQO , donde se aprecia que a pesar de tener pocos datos posteriores a 2009, pero se observa que la biodegradabilidad llega a ser mayor a 0.3 lo que nos indica que existe una biodegradabilidad media; mas sin embargo en el muestreo correspondiente a noviembre de 2014 este valor se encuentran entre el rango $0.1 < DBO_5/DQO < 0.3$ biodegradabilidad media y menores a 0.1 que indica baja biodegradabilidad.

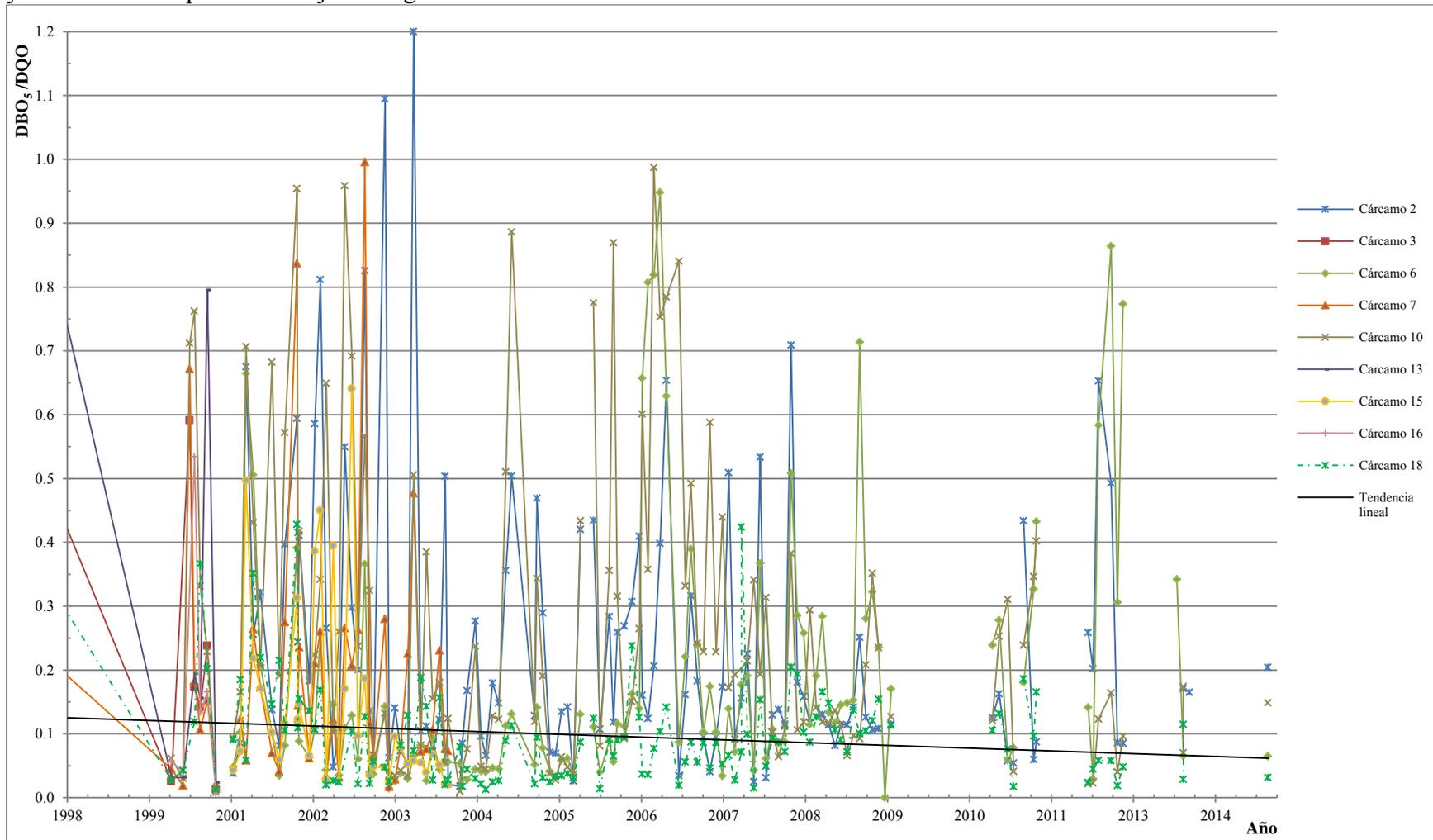


Figura 5-25. Comportamiento de la Relación DBO_5/DQO en el lixiviado de la Etapa 3.

En la figura 5-26, se puede apreciar la tendencia en el aumento de este parámetro de manera general, aunque desde mediados de 2008 y hasta principios de 2009 se pudo apreciar la fuerte influencia en todos los puntos de monitoreo, se podría suponer que es debido a la lluvia.

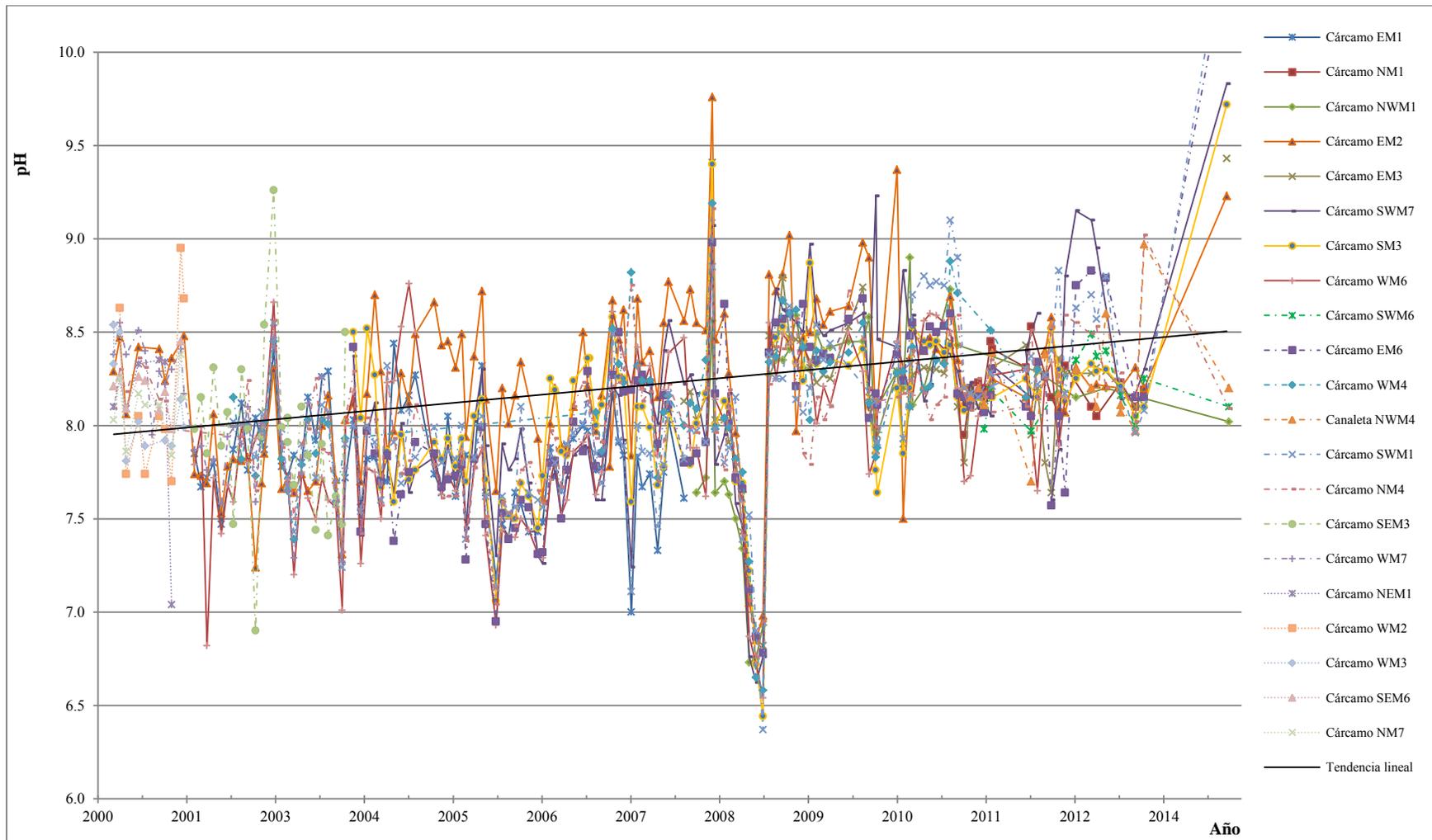


Figura 5-26. Comportamiento del pH en el lixiviado de la Etapa 4.

En la figura 5-27, se aprecia que desde 2010 al año de 2014 la frecuencia de monitoreo disminuyo, se puede observar la tendencia a aumentar, en esta etapa se tienen puntos con diferentes edades los cuales se puede apreciar en sus rangos promedio.

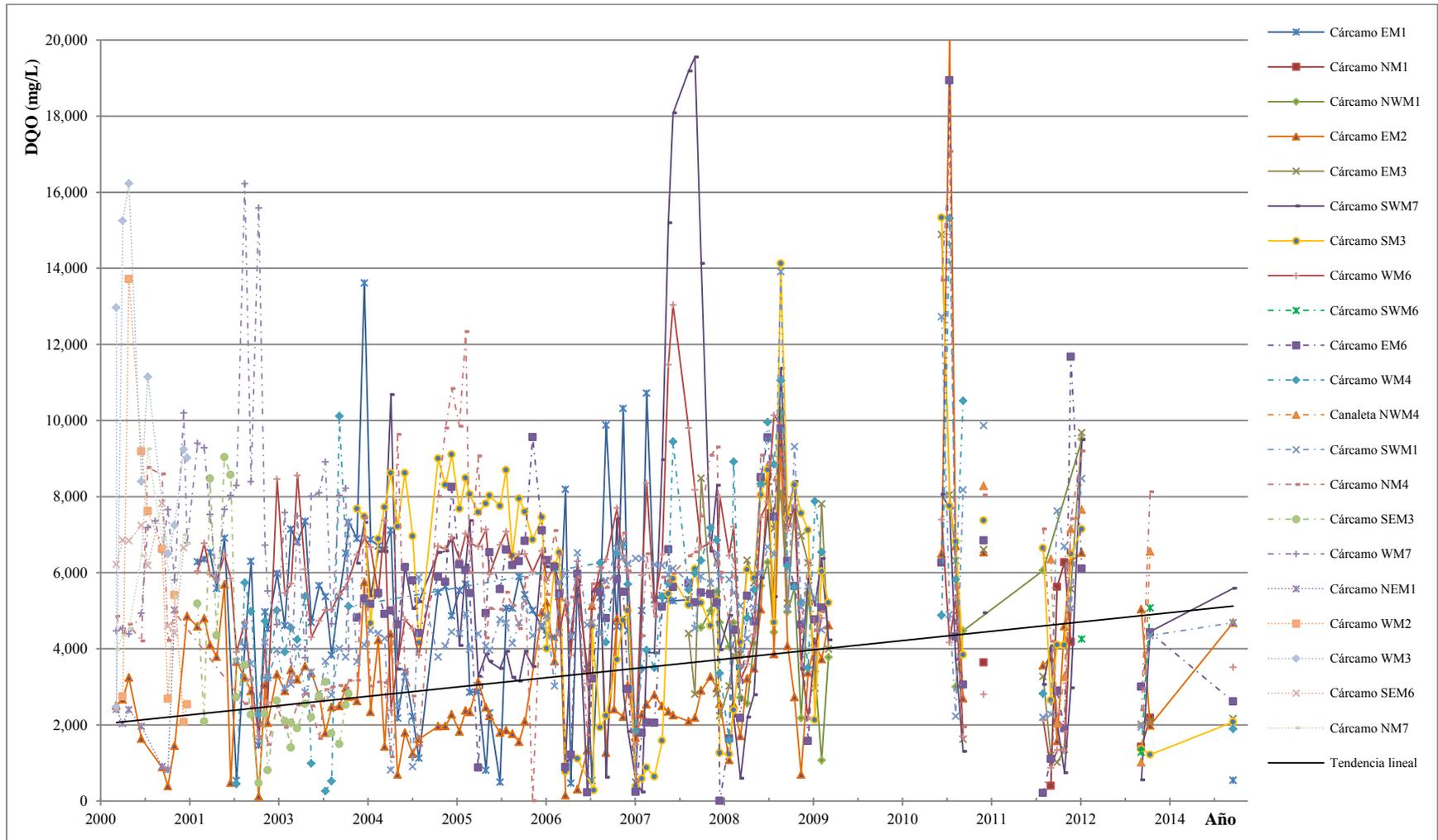


Figura 5-27. Comportamiento de la demanda química de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 4.

En la figura 5-28, se aprecia que desde 2010 al año de 2014, se puede observar de manera general que el comportamiento tiende a mantenerse constante, en esta etapa tienen diferentes edades los desechos, debido a que era una etapa en operación.

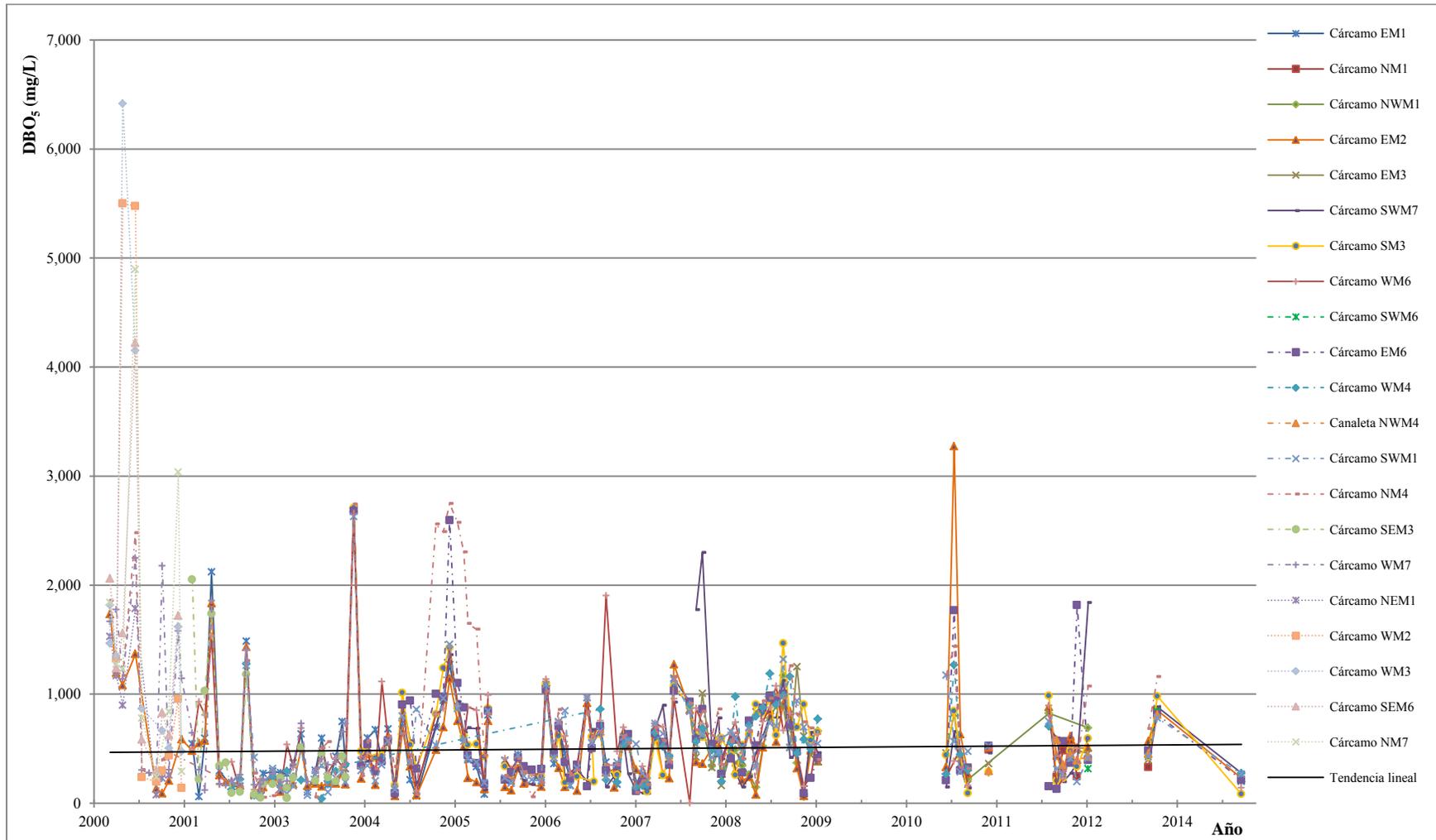


Figura 5-28. Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en el lixiviado de la Etapa 4.

En la figura 5-29 no se tienen muchos datos desde finales de 2009, aunque se dibuja una tendencia lineal pero no se puede extrapolar el comportamiento al año de 2014.

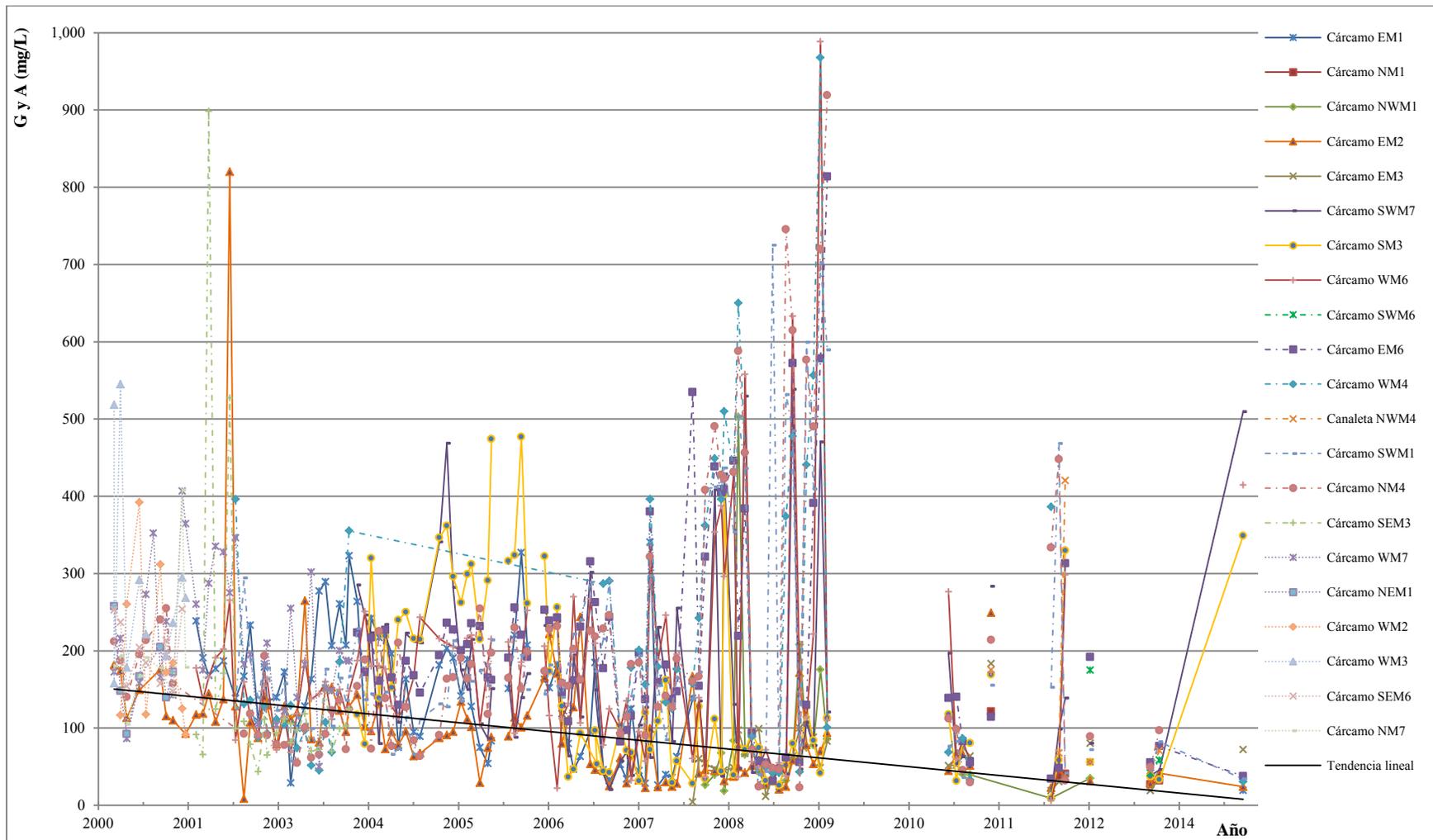


Figura 5-29. Comportamiento de las grasas y aceites en el lixiviado de la Etapa 4.

En la figura 5-30, se comporta más o menos lineal con un pequeño incremento, pero se puede apreciar que después de la mitad de 2008 y hasta mediados de 2009 se presentó un incremento en todos los puntos.

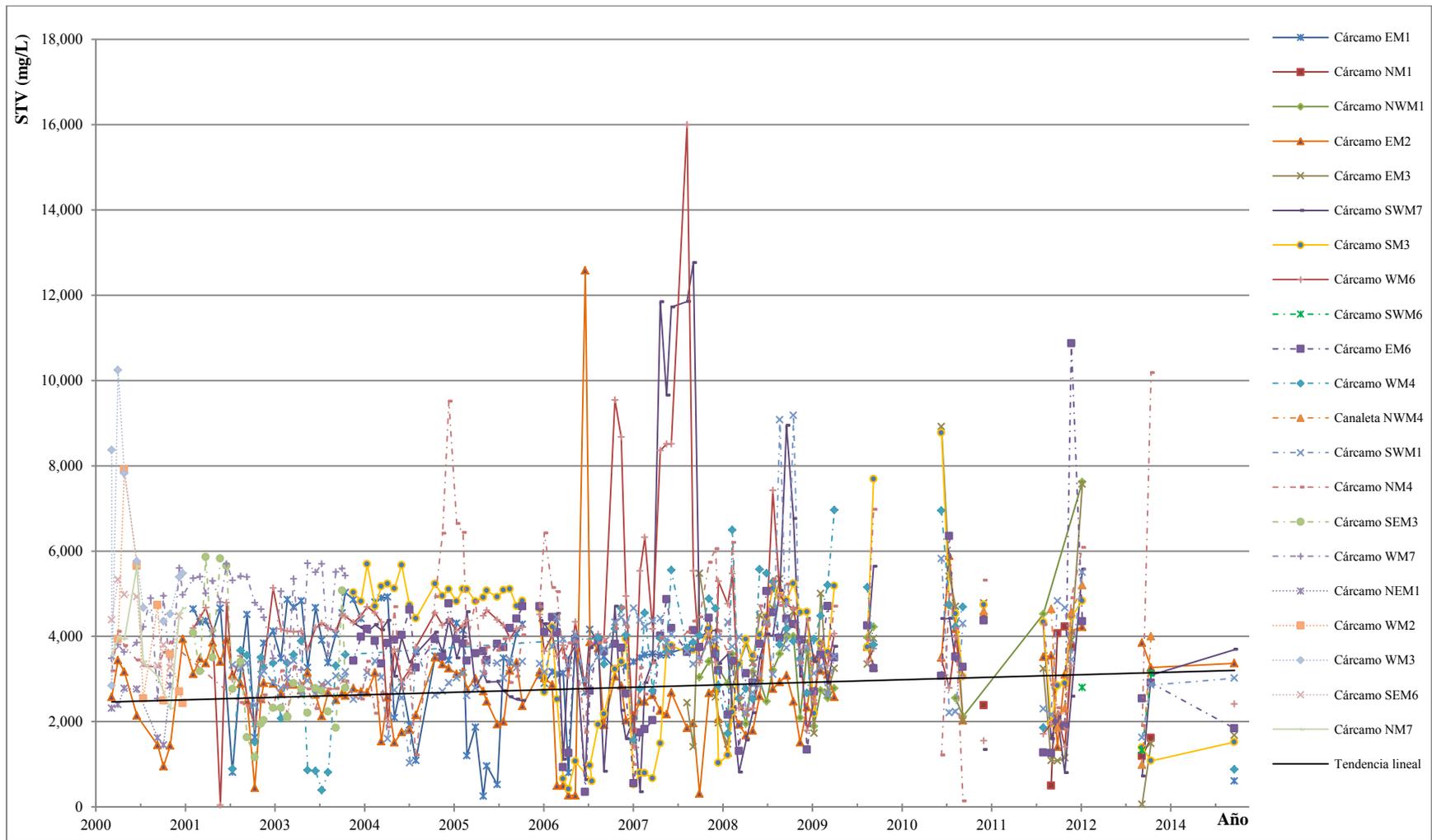


Figura 5-30. Comportamiento de los sólidos totales volátiles en el lixiviado de la Etapa 4.

En la figura 5-31, el comportamiento es muy tendiente a mantenerse constante excepto en el cárcamo NM4 que presenta un incremento muy pronunciado 2003, 2005 y 2006).

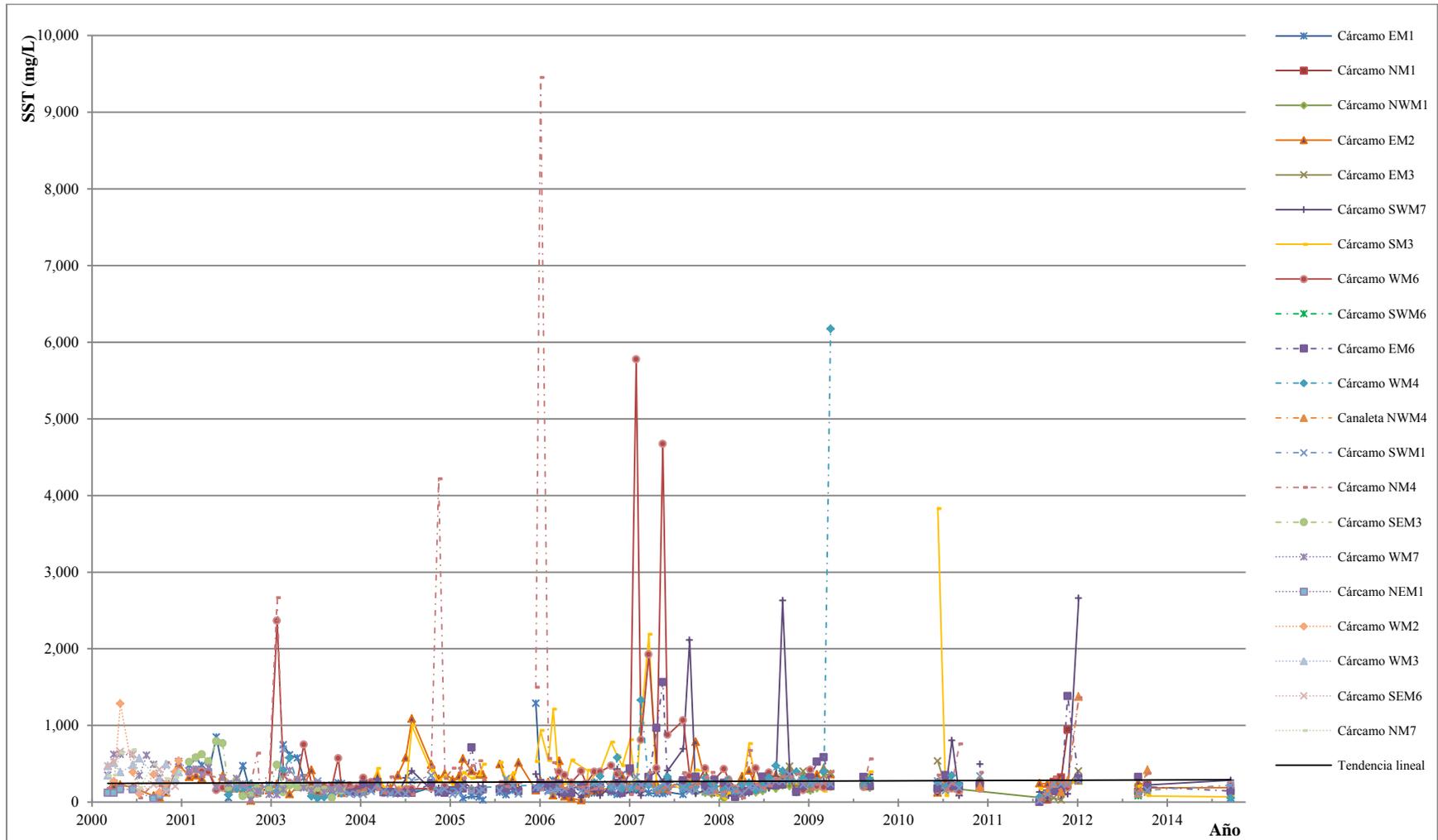


Figura 5-31. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales en el lixiviado de la Etapa 4

La figura 5-32 muestra la relación DBO_5/DQO , donde se aprecia que a pesar de tener pocos datos posteriores a 2009, pero se observa que la biodegradabilidad llega a ser mayor a 0.3 lo que nos indica que existe una biodegradabilidad importante.

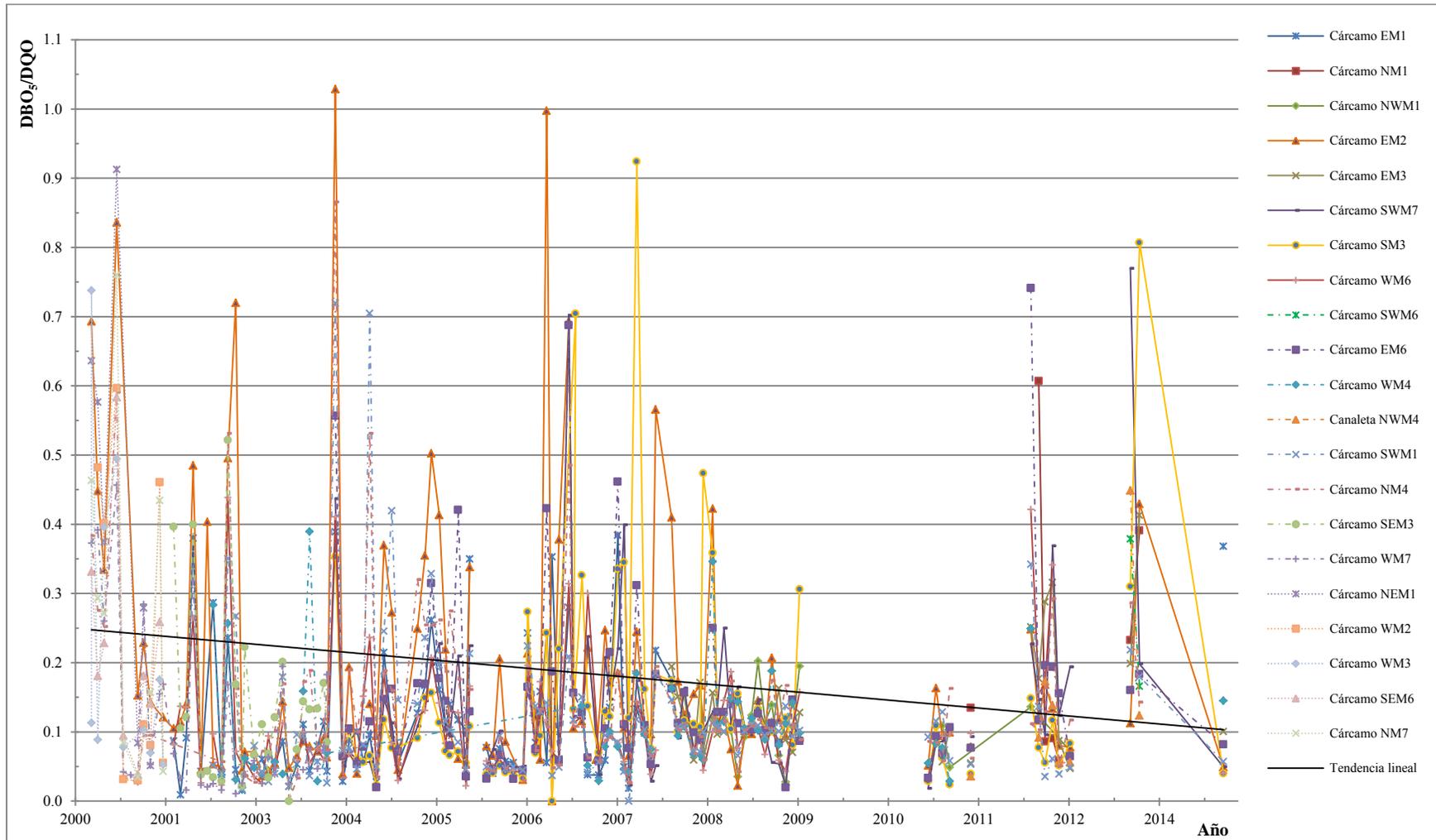


Figura 5-32. Comportamiento de la Relación DBO_5/DQO en el lixiviado de la Etapa 4.

6. CONCLUSIONES

Con respecto al análisis documental que se realizó para obtener información que permitiera estudiar el comportamiento fisicoquímico del lixiviado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente, durante la operación y pos-clausura, se puede concluir que el monitoreo se efectuó mensualmente en cada uno de los puntos para cada una de las cuatro etapas del relleno, la frecuencia fue disminuyendo desde el 2009 hacia el año 2014.

En cada uno de los parámetros analizados, no fue posible realizar un análisis estadístico por algún método matemático tradicional, ya que no ajustaron a alguno de estos modelos, debido a que se representaban correlaciones muy bajas por la gran dispersión de los datos, en consecuencia el análisis de los resultados se realizó de manera esquemática al observar cada una de las gráficas obtenidas, se puede concluir que aún en una misma etapa se tienen comportamientos variados para cada una de las propiedades analizadas, como el caso del pH que en las etapas 1, 2, 3 presentan comportamiento descendiente y en la etapa 4 es ascendente, esto puede deberse a la actividad metanogénica que se lleva a cabo cuando es un lixiviado “*joven*”.

En el caso de las etapas 1 y 2, se puede concluir que el comportamiento de la relación DBO_5/DQO , fue similar ya que la baja biodegradabilidad correspondiente a un lixiviado “*viejo*”, a diferencia de la etapa 3 que se observa una biodegradabilidad moderada, aun siendo “*viejo*” y en la etapa cuatro es en la que se presenta una importante biodegradabilidad, así mismo el pH sigue aumentando en esta etapa del relleno.

Finalmente se puede concluir de los resultados obtenidos durante el 2014, que el lixiviado sigue conservado sus propiedades, de acuerdo a la tendencia de todo el periodo de estudio como lixiviado “*viejo*”.

7. RECOMENDACIONES

En el presente documento se muestran varias graficas donde se muestra en comportamiento del lixiviado a través de los años, pero si se quisiera profundizar en la caracterización, se recomienda realizar un análisis exhaustivo a cada una de estas gráficas, ya que en cada uno de los puntos muestreados se tiene un comportamiento diferente.

Es importante realizar un estudio para analizar el comportamiento del pH al ir disminuyendo en la etapa 1 y 3, aumentar en la etapa 2 y 4, zonas con edades y composición de residuos sólidos diferentes, que no se comportan como lo predice la bibliografía.

Se requiere analizar el comportamiento del pH, para determinar la correlación que pudiera existir, por ejemplo con el CO₂ que es uno de los gases que se generan, pues aunque la NOM-083-SEMARNAT-2003, obliga a monitorear dicho comportamiento, pero existe la incertidumbre de contra que se tendrían que comparar los resultados para “*decidir que ya no presenta riesgo al medio ambiente*”; el presente estudio se puede emplear únicamente como punto de referencia para visualizar el comportamiento y la tendencia.

Se recomienda realizar análisis fisicoquímicos y biológicos al suelo de los alrededores para determinar las características y la posible influencia del lixiviado, a cuerpos de agua de los alrededores (Brazo derecho del Rio Churubusco, Laguna de Regulación Horaria, entre otros), lo que permitiría conocer las características de estos cuerpos acuíferos a lo largo del tiempo (incluir los análisis en estos cuerpos) para así descartar la posible contaminación de relleno sanitario.

El lixiviado de la etapa 1, que es el más antiguo muestra la necesidad de seguir con el monitoreo, a pesar de que fue clausurada hace 22 años, ya que aún puede tener impactos ambientales, por lo que se le debe seguir teniendo los cuidados que permitan darle un tratamiento adecuado.

Como parte de los caprichos de la naturaleza existen organismos que se han desarrollado y adaptado a dichas condiciones ambientales, motivo de gran importancia para realizar su caracterización.

En las imágenes se muestran algunas “formas” que se han reproducido a las orillas de una canaleta de lixiviado, como se muestra en la figuras 8-1 y 8-2. Estas “formas”, son altamente solubles al agua pero pueden encapsular al lixiviado en su interior, un estudio muy importante de evaluar.



Figura 8-1. Desarrollo de “formas” tipo “coralino”, que en su interior atrapan lixiviado.



Figura 8-2. Lixiviado en el interior de un “tubo”.

Existen organismos que se han generado, adaptado y viven en lixiviado como se muestra en la figura 8-3, organismos que se pueden apreciar a simple vista, con formas caprichosas. En el caso de que se pudiera aislar y reproducir estos organismos, se podrían emplear en el tratamiento biológico del lixiviado, ya que los métodos empleados actualmente son solamente fisicoquímicos, por lo tanto este sería un método alternativo de tratamiento que ayudaría a disminuir las sustancias químicas empleadas en el tratamiento.



Figura 8-3. Fotografías de algunos organismos en un charco de lixiviado (aparentemente diluido) con pH de 8.5 en la Etapa 1.

Aunque existen diversos datos se recomienda realizar pruebas CRETIB, para determinar la corrosividad, que es notoria en los materiales ferrosos y algo importante es conocer la toxicidad, a que esta última se pondría en duda ya que como se muestra en la figura 8-3 y 8-4, donde se observa que existen organismos en el lixiviado de la etapa 1. De igual forma existen plantas que se han adaptado y que sus requerimientos hídricos los toman de este líquido, los cuales se pueden apreciar en las figuras 8-5 y 8-6.



Figura 8-4. Crecimiento de algas en un charco de lixiviado con pH=8.5 (aparentemente diluido), en la Etapa 1.



Figura 8-5. Especies vegetales que se han adaptado junto al canal recolector de lixiviado en la etapa 1.



Figura 8-6. Plantas que obtienen sus requerimientos de humedad del lixiviado en la etapa 1.

8. REFERENCIAS

- [1]. Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), *Estudio sobre el manejo de residuos sólidos para la Ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos*, Borrado del informe final, Anexo, Kokusai Kogyo Co., Ltd, (marzo 1999), pp. C-86 y H-30
- [2]. Bhalla, Barjinder, Saini, M. S., Jha, M. K, *Characterization of leachate from municipal solid waste (MSW) landfilling sites of Ludhiana, India: a comparative study*, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com, vol. 2 Issue 6, November – December 2012 (732 - 745), pp. 736
- [3]. Carville, Martin and Robinson, Howard, *Leachate treatment for domestic waste landfills worldwide*, Waste Management World: Technologies and treatment Article published in the November 2005 pp. 3
- [4]. Colegio de Ingenieros Ambientales de México A. C., Colegio de Ingenieros Civiles de México A. C., Colegio de Biólogos de México A. C., Instituto de Ingeniería UNAM, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, *Opinión sobre la clausura del relleno sanitario de Bordo Poniente de la Ciudad de México, Secretaría de Obras y Servicios*, Noviembre de 2008 pp. 7 y 52
- [5]. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*, Constitución publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de febrero de 1917, última reforma publicada DOF 10-02-2014
- [6]. Crites Ron, Tchobanoglous George, *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*, Mc Graw Hill, 2004, pp 48
- [7]. DDF, SOS, DGSU, DTDS, *Caracterización y tratamiento de lixiviados en sitios de disposición final del Distrito Federal*, Diciembre de 1991 pp. 4-5
- [8]. DDF, SOS, DGSU, DTDS, *Identificación de la calidad de los lixiviados a diferentes profundidades en la 1 y 2 etapas del Relleno Sanitario Bordo Poniente; en Bordo Poniente*, Noviembre 1992 pp. 5
- [9]. Departamento del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios, Dirección General de Servicios Urbanos, *Manual de Operación de la Planta de Lixiviados*, Dirección Técnica de Desechos Sólidos, 1997 pp. 1, 5 y 8
- [10]. Environment Agency Guidance on Monitoring of Landfill Leachate, *Groundwater and Surface Water*, (Draft v. 3), June 2002 Draft for Public Consultation, pp. 30, 31, 71 y 73
- [11]. Geosyntec Consultants, *Managed Solid Waste Landfill*, Document No. MD10186, 29 March 2010, pp. 18
- [12]. Heyer K.-U., Stegmann R., *Leachate management: leachate generation, collection, treatment and costs*, Leachate management, pp. 9 (Rev realizada el 06 de dic. de 2014)
- [13]. Johannessen, Lars Mikkell, *Guidance Note on Leachate Management for Municipal Solid Waste Landfills*, Urban Development Division, Urban Waste Management Thematic Group, The International Bank for Reconstruction and Development /The World Bank, 1999 pp. 7 y 8

- [14]. Jude Ifeanyichukwu Madu, *New leachate treatment methods*, Water and Environmental Engineering, Department of Chemical Engineering, Lund University (April 2008), pp. 1
- [15]. Köfalusi, Gábor Kiss y Aguilar, Guillermo Encarnación, *Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final Gaceta ecológica 79 (2006): 39:51* Instituto Nacional de Ecología, México. pp. 44
- [16]. *Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente*, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988, Última reforma publicada DOF 16-01-2014. pp. 1-66
- [17]. Local limits Development Guidance, United States Environmental Agency Office of Wastewater Management 4203, EPA 833-R-04-002A, JULY 2004, pp (consulta realizada el 06 de dic. de 2014)
- [18]. Local limits Development Guidance appendices, United States Environmental Agency Office of Wastewater Management 4203, EPA 833-R-04-002B, JULY 2004, pp k3 (consulta realizada el 06 de dic. de 2014)
- [19]. Ministerio de Medio Ambiente Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, *Por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*, «BOE» núm. 25, de 29 de enero de 2002, (3507 a 3521), pp. 3519 - 3520
- [20]. NMX-AA-005-SCFI-2000, *Análisis de agua - determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-005-1980)*.
- [21]. NMX-AA-008-SCFI-2000, *Análisis de agua - determinación del pH - método de prueba (cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2000)*.
- [22]. NMX-AA-15-1985, *Protección al ambiente - contaminación del suelo – residuos Sólidos municipales - muestreo - método de cuarteo*, DOF 6-noviembre-1992
- [23]. NMX-AA-034-SCFI-2001, *Análisis de agua-determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba (cancela a las NMX-AA-020-1980 y NMX-AA-034-1981)*.
- [24]. NOM-001-SEMARNAT-1996, *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*, DOF, 24 junio 1996
- [25]. NOM-002-SEMARNAT-1996, *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado*, DOF, 9 enero 1997
- [26]. NOM-003-SEMARNAT-1997, *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público*, DOF, 14 agosto 1998
- [27]. NOM-052- SEMARNAT-2005 *Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos*, DOF, 23 de junio de 2006.
- [28]. NOM-083-SEMARNAT-2003, *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*, DOF, 20 octubre 2004
- [29]. Öman, C.B., Junestedt, C., *Chemical characterization of landfill leachates – 400 parameters*, Waste Management (2007) pp.1
- [30]. Orta de Velásquez, Ma. T., Rojas Valencia, Ma. N., Yáñez, I., Monje, I. y Londoño, W de J., *Alternativa de tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en plantas de aguas residuales urbanas*, AIDIS vol. 1, núm. 1, año 2006. pp. 5
- [31]. *Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal*. 13 de Septiembre de 2010, Gaceta Oficial Del Distrito Federal año, pp. 10, 11, 16-18
- [32]. Robles Martínez, F., *Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios*, Instituto Politécnico Nacional. 2ª Edición 2008, pp. 17, 19, 29, 42-43, 61 y 63
- [33]. Robles Valderrama, Esperanza, González Arreaga María Elena, Castillo Nava Pilar, *Contaminantes Químicos y sus efectos en el hombre y el medio ambiente*, UNAM, FESI, 2004, pp 73-74
- [34]. Slomezyńska, B., Slomezyńska, T., *Physico-Chemical and Toxicological Characteristics of Leachates from MSW Landfill*, Polish Journal of Environmental Studies Vol. 13, No 6 (2004), (627-637), pp. 3
- [35]. Stuart, M E & Klinck, B A, *A catalogue of leachate quality for selected landfills from newly industrialized countries*, TECHNICAL REPORT WC/98/49, Overseas Geology Series, Nottingham, British Geological Survey, 1999 pp. 27
- [36]. Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. A., *Gestión integral de residuos sólidos*, Mc Graw Hill. 1994 pp. 407, 437, 470-471, 495 y 758
- [37]. Torres B., Luis Gilberto, Vela C. Adolfo Eduardo, y Orta de V. María Teresa, *Caracterización y tratabilidad del lixiviado de la Etapa IV del Relleno Sanitario de Bordo Poniente, Ciudad de México*. 1998. pp. 2
- [38]. http://appl.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen_2009/07_residuos/cap7_3.html, *Informe El medio Ambiente en México en resumen 2009, (consulta realizada el 09 de febrero de 2015)*.