



SEP

S.E.S.T.N.M.

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

INFORME FINAL DE AÑO SABÁTICO

PROGRAMA 6. ESTADÍAS EN EL SECTOR PRODUCTIVO O EN CENTROS DE INVESTIGACIÓN O INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR: NACIONALES O INTERNACIONALES

TÍTULO DEL PROYECTO

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO MEDIANTE DISEÑO DE CELDA CON BIODEGRADACIÓN ACELERADA

DICTAMEN No. AS-1-198/2017

PRESENTA:

DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL

REVISOR

DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ

Metepec, Estado de México, 22 de enero de 2018

RESUMEN

Los Rellenos Sanitarios (RESA) constituyen una fuente importante de Gases de Efecto Invernadero (GEI), debido a que el biogás, resultado de la descomposición biológica de la fracción orgánica de los RSU, contiene Metano (CH_4) y Bióxido de carbono (CO_2). El CH_4 del biogás es una alternativa de fuente renovable que ya se utiliza en países desarrollados y en algunos países en vías de desarrollo. En México el RESA es la tecnología más utilizada, sin embargo estos sitios de disposición final requieren para estabilizarse más de 20 años, por lo que pueden convertirse en pasivos ambientales si no se les supervisa adecuadamente una vez clausurados. Una opción es acelerar la biodegradación de la fracción orgánica de los RSU mediante la recirculación de lixiviados y aprovechar el CH_4 energeticamente.

Conforme a lo anterior, este trabajo de año sabático desarrollado dentro del Programa 6, tiene como objetivo determinar el aprovechamiento energético de dos celdas del RESA de Zinacantepec, mediante su diseño con biodegradación acelerada. Este RESA está bajo la operación de la empresa Mantenimientos y Servicios Ambientales S.A. de C.V. (MASERA), que ha tenido a bien aceptar la estadía de la profesora en Año Sabático.

El presente informe comprende las actividades programadas y desarrolladas durante 12 meses, las cuales cubren los objetivos planteados, logrando elaborar una propuesta de diseño viable técnica, económica y ambientalmente para la operación como Bio-RESA con recirculación en pozos de las C4 y C5.

OBJETIVOS

- a) Caracterizar los RSU y el material de cobertura de dos celdas tipo rellenos sanitarios (RESA) con diferentes edades.
- b) Caracterizar los GEI generados en las celdas seleccionadas en épocas de estiaje y lluvias.
- c) Caracterizar los lixiviados generados de las dos celdas tipo RESA en épocas de estiaje y lluvias.
- d) Evaluar las condiciones de operación de las celdas seleccionadas conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003
- e) Determinar mediante simulación con MODUELO la generación de biogás y lixiviados, bajo el escenario actual de operación de dos celdas tipo RESA.
- f) Determinar mediante simulación con MODUELO la generación de biogás a diferentes tasas de recirculación en dos celdas tipo Biorrelleno (Bio-RESA).
- g) Evaluar técnica, económica y ambientalmente sistemas de recirculación de lixiviados, captación de biogás y generación de electricidad, para operar las celdas seleccionadas como Bio-RESA.
- h) Elaborar una propuesta de diseño viable para las celdas seleccionadas, que incremente el aprovechamiento energético del biogás y se minimice las emisiones de GEI a la atmósfera.

INDICE

RESUMEN	i
INDICE	ii
OBJETIVOS	iii
INTRODUCCIÓN	1
1. REPORTE TÉCNICO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU Y EL MATERIAL DE COBERTURA	4
2. REPORTE TÉCNICO DE LAS CARACTERIZACIONES DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO Y LIXIVIADOS	10
3. REPORTE TÉCNICO DE LA EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LAS CELDAS SELECCIONADAS	14
4. REPORTE DE ESTANCIA DE INVESTIGACIÓN	16
4.1 Modelo de simulación	17
4.2 Sintonización de Modulo 4.0	26
5. REPORTE DE LAS SIMULACIONES CON MODULO 4.0	29
6. REPORTE DE EVALUACIONES DE CELDAS TIPO BIO-RESA	32
6.1 Evaluación técnica	32
6.2 Evaluación ambiental	36
6.3 Evaluación económica	39
CONCLUSIONES	47
REFERENCIAS	48
ANEXO A Estancia Universidad de Cantabria	54
ANEXO B COMEXTRA	55
ANEXO C Participación 1 VII Simposio Iberoamericano en IR	56
ANEXO D Participación 2 VII Simposio Iberoamericano en IR	57
ANEXO E Participación ANCA 2017	58
ANEXO F Divulgación Científica SOMERS-IPN	59
ANEXO G Acepta Revista Internacional de Contaminación Ambiental	60

INTRODUCCIÓN

México se ubica actualmente entre los 15 principales emisores de gases de efecto invernadero (GEI) y reconoce al cambio climático como un problema global que requiere la acción de todos los países, por lo que ha establecido metas voluntarias de reducción de emisiones de GEI hacia el 2020, 2030 y 2050 (SEMARNAT-INECC, 2013; SEMARNAT, 2015a; SEMARNAT, 2015b). Los sectores que contribuyen con las emisiones de GEI del país son: Energía, Procesos industriales, Uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura, Agricultura y Desechos. En este último sector se tienen los rellenos sanitarios (RESA), aguas residuales e incineración (INE, 2010; INECC, 2012; OCDE, 2012; OMM, 2013).

Los RESA constituyen una fuente importante de GEI debido a que el biogás, resultado de la descomposición biológica de la fracción orgánica de los RSU, contiene Metano (CH_4) y Bióxido de carbono (CO_2). El CH_4 del biogás es una alternativa de fuente renovable que ya se utiliza en países desarrollados (Alemania, Inglaterra, E.U.) y en algunos países en vías de desarrollo (Colombia, Argentina, México), produciendo energía eléctrica (GRID, 2013; NOAA & NCDC, 2013; PNUD 2011; UNFPA, 2014).

En México el RESA es la tecnología más utilizada, la cual incrementó su número a 260 para el 2012, lográndose una disposición entre RESA y rellenos de tierra controlados del 78% de los RSU (SEMARNAT, 2015a), sin embargo estos sitios de disposición final requieren para estabilizarse más de 20 años, por lo que pueden convertirse en pasivos ambientales si no se les supervisa adecuadamente una vez clausurados (Ali *et al.*, 2015; SEMARNAT-INECC, 2013; Sopkas *et al.*, 2003; Sopkas *et al.*, 2005; Staines 2007). Una opción es acelerar la biodegradación de la fracción orgánica de los RSU mediante la recirculación de lixiviados, lo que propicia el incremento de la generación de biogás. Si bien se tiene estudios sobre biodegradación acelerada en otras partes del mundo (Aguilar, 2012; Barry *et al.*, 2004; Crowe *et al.*, 2002), en México son escasas las investigaciones a escalas laboratorio y piloto, además de que la composición de los RSU y el clima de cada zona del país es diferente (Conde, 2010; González-Razo, 2012), por lo que es importante determinar la tasa de recirculación de lixiviados apropiada y las condiciones operacionales adecuadas a escala campo (Machado *et al.*, 2008; Sánchez, 2006; Wang-Yao *et al.*, 2006; Wrefor *et al.*, 2000; Zach *et al.*, 2000).

Conforme a lo anterior, el presente trabajo pretende determinar el aprovechamiento energético de dos celdas del RESA de Zinacantepec, mediante su diseño con biodegradación acelerada. Para ello se recabará información documental y de campo del sitio de disposición, se trabajará de la mano con el personal de la empresa Mantenimientos y Servicios Ambientales S.A. de C.V. (MASERA), se simularán diferentes escenarios con tasas de recirculación de lixiviados y se evaluarán técnica, económica y ambientalmente las opciones, con

el fin de proponer un diseño que minimice las emisiones de biogás a la atmósfera y maximice al aprovechamiento del CH₄ para la generación de energía eléctrica.

En la tabla 1 se presenta el cronograma propuesto para la realización de este proyecto. El RESA de Zinacantepec se ubica en el Ejido de San Luis Mextepec, de Zinacantepec, Estado de México, en la carretera No. 15 Toluca-Morelia Km 11.5 (19.323729, -99.773766) (Figura 1). En cuanto a las celdas a estudiar, se convino con el personal de la empresa MASERA seleccionar las celdas 4 y 5 (C4 y C5) y las fosas de lixiviados 2 y 3 (Figura 2).

Tabla 1. Cronograma del proyecto de año sabático.

ACTIVIDAD	1er. Semestre 2017						2o. Semestre 2017						2018
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E
Selección de dos celdas de disposición de RSU tipo RESA en acuerdo con empresa MASERA													
Selección espacial de puntos de muestreo de RSU, suelo, lixiviados y GEI de dos celdas seleccionadas													
Caracterización fisicoquímica de RSU y material de cobertura													
Muestreo en los puntos seleccionados, medición de flujos de biogás y análisis de la composición de GEI													
Muestreo y caracterización de lixiviados en puntos seleccionados													
Evaluación de las condiciones de operación de las dos celdas tipo RESA													
Recopilación de información climatológica del RESA de Zinacantepec y de celdas seleccionadas													
Capacitación sobre requerimientos y operación del simulador MODUELO													
Simulación con MODUELO de la generación de biogás y lixiviados de dos celdas tipo RESA													
Simulación con MODUELO de la generación de biogás a diferentes tasas de recirculación en dos celdas tipo Bio-RESA													
Evaluación técnica-económica de dos de sistemas para operar las celdas seleccionadas como Bio-RESA y generar energía eléctrica													
Evaluación del impacto ambiental de la aplicación de cada una de las tecnologías													
Escritura de propuesta y presentación la empresa MASERA de resultados finales													
Escritura de artículos científicos													
Participación en eventos técnico-científicos nacionales y/o internacionales													
Elaboración de Reportes de cada etapa													
Elaboración y entrega de informes semestral y anual de Año Sabático													



Figura 1. RESA, carretera No. 15 km 11.5.



Figura 2. Celdas y fosas del RESA

1. REPORTE TÉCNICO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y EL MATERIAL DE COBERTURA

La gestión integral de los residuos sólidos urbanos (GIRSU) continúa siendo un tema pendiente para América Latina y el Caribe (ALC). De acuerdo con el Banco Mundial, se proyecta que la generación de RSU en esta área del mundo pasará de las 130 millones de toneladas que se produjeron en el 2012, a 220 millones de toneladas en 2025 (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012). Sin embargo, para la GIRSU no basta con conocer la composición de los RSU, es fundamental para planificar cualquier tipo de estrategia para el manejo integral de los RSU (MIRSU), aunque es complejo obtener datos de buena calidad y consistentes (OPS-AIDIIS-BID 2010; Hernández-Berriel *et al.*, 2016).

Conforme a lo anterior y debido a que este estudio versa sobre los RSU dispuestos en el RESA de Zinacantepec, que es la última etapa del MIRSU (disposición final), se decidió caracterizar los RSU en las C4 y C5 respectivamente Figuras 1.1 y 1.2. Para ello, con apoyo de maquinaria de la empresa MASERA (Figura 1.3) se tomaron en cada celda, aproximadamente 100 kg de cinco puntos diferentes de la capa superficial y se colocaron en un área de suelo adena. Posteriormente se mezclaron y se aplicaron las técnicas listadas en la tabla 1.1, las cuales corresponden a la normatividad mexicana vigente (SEMARNAT, 2017). Para la caracterización fisicoquímica se trasladaron muestras al Instituto Tecnológico de Toluca y se utilizaron las técnicas mostradas en la tabla 1.2 (Figura 1.4).



Figura 1.1 Acercamiento a C4



Figura 1.2 Acercamiento a C5.



Figura 1.3 Muestreo con garra mecánica de RSU.



Figura 1.4 Tambo para peso volumétrico y traslado de RSU.

Tabla 1.1 Normas utilizadas para la caracterización de RSU.

NORMA	NOMBRE
NMX-AA-15-1985	Protección al ambiente-Contaminación de suelos-Residuos Sólidos Urbanos-Muestreo-Método del cuarteo.
NMX-AA-22-1985	Protección al ambiente-Contaminación de suelos-Residuos Sólidos Urbanos-Selección y cuantificación de subproductos.
NMX-AA-19-1985	Protección al ambiente-Contaminación de suelos-Residuos Sólidos Urbanos-Peso volumétrico "in situ"

Fuente: SEMARNAT, 2017.

Tabla 1.2 Normas utilizadas para la caracterización fisicoquímica de RSU.

NORMA	NOMBRE
NMX-AA-013-SCFI-2006 ^b	Residuos Sólidos-Determinación de pH
NMX-AA-16-1984 ^b	Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación humedad
MÉTODO 2540G ^a	Método para determinar cenizas
NMX-AA-021-1981*	Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Materia Orgánica
NMX-AA-024-1984 ^b	Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Nitrógeno Total
NMX-AA-067-1985 ^b	Protección al ambiente-Contaminación del suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la Relación Carbono/Nitrógeno

*Adaptación con base a capacitación del Instituto de Investigación y Capacitación, Agropecuaria, Acuícola y Forestal del Estado de México (ICAMEX)

Fuente: ^a APHA, 2005; ^b SEMARNAT, 2017

En la tabla 1.3 se presentan los resultados de la caracterización, así como datos de caracterizaciones anteriores reportadas por Díaz-Archundia (2016). Los subproductos se presentan agrupados como lo solicita el Modelo Mexicano de Biogás (MMB) de acuerdo a las características orgánicas e inorgánicas y la rapidez de degradación (SCS Engineers, 2009).

Tabla 1.3. Caracterización física de RSU del RESA de Zinacantepec.

Celda	C3		C1	C3	C4	C4	C5
	Estiaje	Lluvias		Estiaje	Lluvias		Estiaje
Subproducto	2013	2013		2014	2014		2017
	%	%		%	%		%
Comida	9.6	5.47	0.98	6.14	9.89	14.66	17.80
Otros Orgánicos	12.9	17.48	17.89	20.63	18.81	19.90	18.40
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	4.2	3.1	2.12	2.03	4.7	5.33	5.38
Poda (jardines)	1.4	7.24	1.36	5.73	2.62	1.19	1.61
Papel Higiénico	4.2	3.1	2.12	2.03	4.7	1.87	3.58
Textiles	3.6	4.54	5.7	5.79	3.51	6.81	8.90
Papel y Cartón	9.4	16.79	11.58	12.06	8.21	10.62	5.09
Madera	0.7	0.75	1.61	0.23	1.12	0.99	0.53
Caucho. Piel. Huesos y Paja	2.3	0.27	0.09	0.62	0.2	1.98	0.43
Metales	1.3	0.96	1.32	2.15	1.64	1.03	1.79
Construcción y demolición	6.8	1.28	4.86	3.09	3.44	3.27	3.53
Vidrio y Cerámica	2.2	2.59	2.46	2.09	2.4	1.98	3.38
Plásticos	21.5	27.55	46.33	27.37	23.28	20.90	18.10
Otros Inorgánicos	19.8	8.89	1.56	10.02	15.47	9.49	11.49

Como puede apreciarse existen diferencias entre las celdas y entre los resultados de la misma celda (C3 y C4) en diferentes años. También puede observarse que en el último semestre el contenido de comida y de pañales se han incrementado, y por ende la materia orgánica; mientras que el rubro de plásticos ha disminuido, lo cual puede atribuirse al trabajo de separación y acopio que realizan en el sitio segregadores primarios. En la tabla 1.4 se presentan los resultados fisicoquímicos, los cuales se corresponden con la caracterización física de los RSU, pues la C5 contiene un mayor contenido de MO. La reducción de la MO permitiría reducir la generación de GEI y reducir la huella de carbono del sitio (Díaz-Villavicencio et al., 2013; Eriksson et al., 2015).

Tabla 1.4 Composición fisicoquímica de RSU del RESA de Zinacantepec.

PARÁMETRO	C4	C5
pH	7.45	6.77
SVT %	57.35	58.02
%Hbh	34.12	38.74
N %	0.71	0.70
C/N	16.67	20.40
MO	20.41	24.62

La degradación de los RSU en un RESA y su estabilización, depende de los microorganismos que convierten las macromoléculas de la MO en CH₄, los cuales están presentes en cantidades diferentes en los RSU frescos y el suelo; este último aporta también micronutrientes, afecta la permeabilidad y da soporte (Tchobanoglous *et al.*, 1994). Con respecto a la alcalinidad y el pH, el material de cobertura (generalmente suelo de la localidad donde se encuentra el sitio de disposición, o bien RSU de la industria de la construcción y demolición) juegan un papel clave como mecanismo de atenuación de contaminantes, además, es un agente con propiedades buffer y con la capacidad de intercambiar cationes. En la tabla 1.5 se muestran diferentes tipos de suelo y algunas de sus características reportadas por Márquez-Benavides (2004).

Tabla 1.5 Características de texturas de suelo

Composición (Malla)	Darleith Serie Orgánico	Dreghorn Serie Limo-arenoso	Swafham Previa serie Arenoso	Dreghorn Serie Calizo
Arena Gruesa % (>0.18 mm)	22.96 ± 1.34	33.61 ± 0.65	87.25 (0.58)	42.37 (1.55)
Arena Fina % (0.18-0.05 mm)	17.4 ± 1.29	25.42 ± 1.05	3.4 ± 0.58	18.45 ± 0.67
Limo % (0.05-0.002)	39.63 ± 2.15	28.69 ± 2.28	5.97 ± 0.18	21.34 ± 0.55
Arcilla % (<0.002 mm)	20.1 ± 3.43	13.27 ± 3.53	2.66 ± 0.37	16.3 ± 2.21
Textura	limo-arcilloso	limo-arenoso	Arenoso	limo-arenoso
*LOI %	22.98 ± 0.25	9.04 ± 0.07	6.51 ± 0.18	9.31 ± 1.15
pH (agua)	4.52 ± 0.2	6.40 ± 0.07	6.79 ± 0.0	8.09 ± 0.14

*Pérdida por ignición como porcentaje de peso seco

Fuente: Márquez-Benavides, 2004.

Para este estudio se muestreo el suelo de cobertura de las C4 y C5, tomando tres puntos separados cada 50 m haciendo un arreglo triangular. Cada punto de muestreo se realizó con ayuda de una pala para excavar hasta aproximadamente 50 cm de profundidad, de donde se tomaron alrededor de 10 kg y se guardaron en bolsas de polietileno para su traslado al Laboratorio de Investigación de Ingeniería Ambiental

(LIIA) del Instituto Tecnológico de Toluca, para realizar la caracterización fisicoquímica a cada punto. A las muestras se les disgregó con un partillo de madera (Figuras 1.5 y 1.6), para posteriormente determinarles pH y temperatura (NMX-AA-025-1984), contenido de humedad base húmeda (%Hbh) (NMX-AA16-1984) y sólidos volátiles totales (SVT) (Técnica 2540 G del Standard Methods) (APHA, 1998; SEMARNAT, 2017), textura por tamizado (ASTM D-422) y sedimentación (NOM-021SEMARNAT-2000), así como composición mediante granulometría (Torres-Corral, 2012; USDA, 2015).

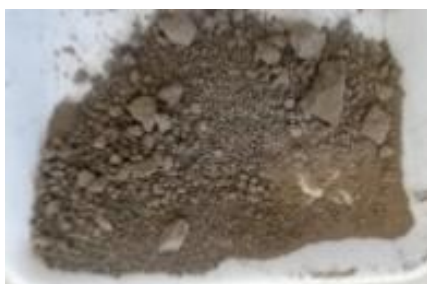


Figura 1.5 Suelo muestreado.



Figura 1.6 Disgregación de suelo

En la tabla 1.6 se concentran los resultados de los suelos muestreados en la C4 y C5 del RESA de Zinacantepec. De acuerdo al pH promedio de la C4 el suelo se puede considerar ligeramente ácido y de tipo limo-arenoso, mientras que en la C5 el suelo es fuertemente alcalino y podría considerarse calizo (Márquez-Benavides, 2004). El suelo de cobertura muestreado en la C5 contiene mayor humedad que el de la C4 y ambos contenidos bajos de SVT.

Tabla 1.6. Caracterización de suelo de C4 y C5.

SUELO	pH	Temperatura (°C)	Tipo de suelo	Humedad (%Hbh).	SVT (% bs)	Coefficiente de uniformidad y porosidad
C4	6.87 ± 0.2	20.40 ± 0.1	Limo-arenoso	8.41 ± 0.2	4.83 ± 0.2	3.9 ± 0.40
C5	8.32 ± 0.4	20.03 ± 0.3	Calizo	17.65 ± 0.5	4.72 ± 0.1	4.00 ± 0.6

Para el suelo de la C5 que es un tanto arenoso, el Coeficiente de uniformidad y porosidad presentó un valor promedio de 4.00 ± 2.6 , lo cual indica que es un suelo uniforme, por lo que su porosidad es media y puede permitir una migración considerable los fluidos, mientras que el suelo de la C4 tiene menor porcentaje de arena, con un coeficiente de uniformidad de aproximadamente 3.9 ± 0.40 y es un suelo bien graduado, por lo que su porosidad es media y al ser su valor cercano a 4, puede aún tener la capacidad de filtrar los lixiviados, aunque menor que el suelo de la C5 (García-Maya, 2011; Torres-Corral, 2012).

Una vez realizada la prueba de tamizado, las muestras de suelo que pasaron la malla 200 fueron utilizadas para la prueba de sedimentación. De acuerdo a la densidad leída para obtener los porcentajes de Arcilla (A), Arena (Ar) y Limo (L) y con apoyo del triángulo de texturas, se determinó para las dos celdas una textura de tipo Franca, de acuerdo al promedio de los tres puntos muestreados (Tabla 1.7), los cuales se representan en las figuras 1.7 y 1.8.

Tabla 1.7 Porcentajes de Arcilla, Arena y Limo para triángulo de texturas

Composición	C4			C5		
	(Rojo)	(Verde)	(Azul)	(Rojo)	(Verde)	(Azul)
%Arcilla	7.8	15	18	15	15	12
%Arena	65	38	40.1	49	38.5	44
%Limo	27.2	47	41.9	36	46.5	44

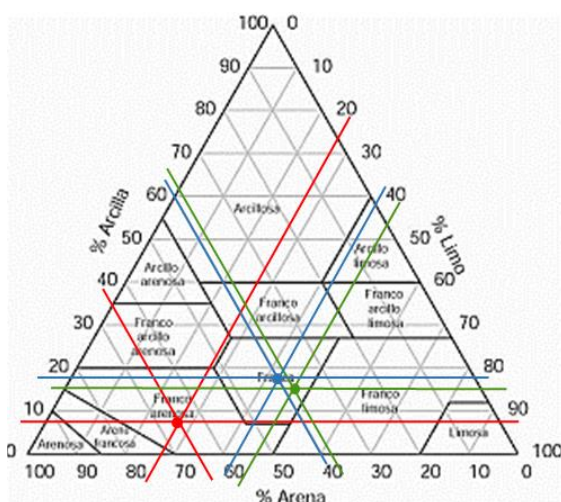


Figura 1.7 Triángulo de texturas para Suelo de C4

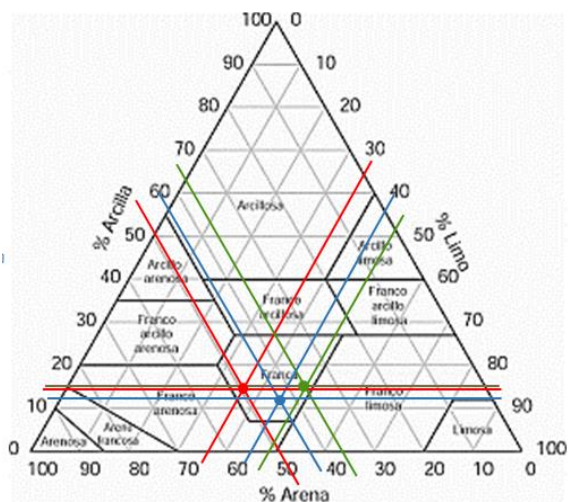


Figura 1.8 Triángulo de texturas para Suelo de C5

2. REPORTE TÉCNICO DE LAS CARACTERIZACIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y LIXIVIADOS

En la figura 2.1 se muestra la localización de los pozos de biogás (25, 25 y 31) y fosas de lixiviados 2 y 3 muestreado en el RESA de Zinacantepec, , debido a los alcances de este reporte.



Figura 2.1 Pozos de venteo muestreados (color amarillo) y lagunas o fosas de lixiviados 2 y 3 del RESA de San Luis Mextepec, Zinacantepec, Edo. de México.

Para la caracterización de lixiviados se han implementado las técnicas que la normatividad mexicana tiene en vigor para aguas residuales, debido a que no se cuenta con técnicas para lixiviados. En la tabla 2.1 se listan las normas y métodos que avalan dichas técnicas.

Tabla 2.1 Normas mexicanas y métodos utilizados para caracterizar lixiviados

Parámetros	Normas mexicanas y métodos
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000 ^a
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000 ^a
Demanda química de oxígeno	Método dicromato, aprobado por la USEPA ^b
Sólidos Volátiles Totales	NMX-AA-034-SCFI-2001 ^a
Metales pesados	NMX-AA-051-SCFI-2016 ^b

^a SEMARNAT, 2016; ^b HACH, 1997, DOF, 2016.

En las tabla 2.2 y 2.3 se muestran los resultados de los lixiviados muestreados en las fosas 2 y 3 durante febrero y agosto 2017, con base a la NMX-AA-003-1980 (SERMARNAT, 2016). Estos lixiviados fueron muestreados de manera puntual con ayuda del personal de MASERA.

Tabla 2.2 Caracterización de lixiviados en febrero 2017

Parámetro	Unidades	Resultado Laguna o Fosa de Lixiviados 2	Resultado Laguna o Fosa de Lixiviados 3	LMP / CPR NOM-SEMARNAT-052-2005*	LMP en Ríos P.M.-P.D. NOM-ECOL-001-1996
Temperatura “ <i>in situ</i> ”	°C	15.43	17.04	NA	40.0-40.0
pH “ <i>in situ</i> ”	NA	8.39	8.34	NA	5.0 a 10.0
Conductividad Eléctrica “ <i>in situ</i> ”	mS/cm	13.37	13.23	NA	NA
SVT	mg/L	7,374.7	3,420.00	NA	NA
DQO	mg/L	11,239.4	2658	NA	NA
Cu	mg/L	NQ	2.10	NR/Th	4.0-6-0
Zn	mg/L	1.98	NQ	NR/Th	10.0-20.0
Cd	mg/L	ND	NQ	1.0	0.1-0.2
Ni	mg/L	0.67	NQ	NR/Th	2.0-4.0
Mn	mg/L	14.17	14.28	NR/Th	NR
Pb	mg/L	NQ	NQ	5.0	0.2-0.4
Fe	mg/L	30.65	48.51	NR	NR
Cr	mg/L	0.52	0.42	5.0	0.5-1.0

CPR: Códigos de peligrosidad de los residuos, LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, ND: No Detectado, NQ: No cuantificable, NR: No reportado, P.D.: Promedio diario, P.M.: Promedio Mensual, Th: Toxicidad aguda.

* DOF, 2006.

Tabla 2.3 Caracterización de lixiviados en agosto 2017

Parámetro	Unidades	Resultado Laguna o Fosa de Lixiviados 2	Resultado Laguna o Fosa de Lixiviados 3	LMP / CPR NOM-SEMARNAT-052-2005*	LMP en Ríos P.M.-P.D. NOM-ECOL-001-1996
Temperatura “ <i>in situ</i> ”	°C	19.40	19.43	NA	40.0-40.0
pH “ <i>in situ</i> ”	NA	8.36	8.55	NA	5.0 a 10.0
Conductividad Eléctrica “ <i>in situ</i> ”	mS/cm	13.73	7.02	NA	NA
SVT	mg/L	6311.11	1722.22	NA	NA
DQO	mg/L	8299.11	2325.00	NA	NA
Cu	mg/L	NQ	NQ	NR/Th	4.0-6-0
Zn	mg/L	0.04	NQ	NR/Th	10.0-20.0
Cd	mg/L	NQ	NQ	1.0	0.1-0.2
Ni	mg/L	NQ	NQ	NR/Th	2.0-4.0
Mn	mg/L	2.74	1.08	NR/Th	NR
Pb	mg/L	NQ	NQ	5.0	0.2-0.4
Fe	mg/L	18.34	33.57	NR	NR
Cr	mg/L	NQ	NQ	5.0	0.5-1.0

CPR: Códigos de peligrosidad de los residuos, LMP: Límite máximo permisible, NA: No aplica, ND: No Detectado, NQ: No cuantificable, NR: No reportado, P.D.: Promedio diario, P.M.: Promedio Mensual, Th: Toxicidad aguda.

* DOF, 2006.

De acuerdo a los resultados obtenidos (Tablas 2.2 y 2.3), al compararlos con los límites máximos permisibles (LMP) dictados por la normatividad mexicana, los lixiviados de ambas fosas tanto en estiaje como en lluvias no representan en lo general un riesgo ambiental, debido a que los parámetros como Temperatura, pH, Cu, Zn, Ni y Cr, no rebasan los LMP de las NOM-SEMARNAT-052-2005 y NOM-ECOL-001-1996, mientras que para Cd y Pb, sus concentraciones no fueron detectadas o cuantificadas (DOF, 2006; SEMARNAT, 2016).

En cuanto a las cargas orgánicas (SVT y DQO), la fosa 2 presenta valores mayores que la fosa 3, lo cual puede ser debido a que en esta fosa llegan los lixiviados de la C5, la cual se encuentra a en operación, mientras que la C4 es una celda clausurada. La NMX-AA-051-SCFI-2001 define al LMP como el valor o intervalo expresado en unidades de concentración, cantidad de materia o unidades específicas, asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales (SEMARNAT, 2016).

Comparando los resultados de las tablas 2.2 y 2.3, puede verse que la temperatura es menor en febrero que en agosto, debido a la temperatura

ambiental en época de invierno; y que los valores en estiaje (febrero 2017) son mayores que los de lluvias (agosto 2017), lo cual puede atribuirse a la dilución por efecto de la lluvia.

En la tabla 2.4 se presentan las caracterizaciones de los pozos 25, 26 y 31 de las C4 y C5, realizada *in situ* mediante el cromatógrafo portátil GEM-2000 marca LANDTEC. Como puede observarse, en la C4 existe una mayor generación de CH₄ y debido a que su valor es superior al 50 %, así como sus respectivas concentraciones de CO₂, se encuentra en fase de biodegradación metanogénica acelerada (Hernandez-Berriel, 2014; Mohammad *et al.*, 2017); mientras que el pozo 31 se encuentra instalado en una celda en operación, donde se continúan depositando RSU frescos, lo cual corresponde con los resultados reportados, donde no se ha establecido la fase metanogénica, e incluso no fue posible determina el flujo de biogás. Comparando las épocas del año, se observa que en lluvias (agosto) se obtuvo una mayor generación de CH₄ y de H₂S, así como mayores valores de temperatura.

Tabla 2.4. Resultados de caracterización de biogás del RESA de Zinacantepec.

PARÁMETRO	POZO 25, C4		POZO 26, C4		POZO 31, C5	
	Febrero	Agosto	Febrero	Agosto	Febrero	Agosto
CH ₄ (% mol B.S.)	57.15	57.60	57.10	57.90	2.50	46.60
CO ₂ (% mol B.S.)	42.75	42.30	42.80	42.00	1.50	53.20
O ₂ (% mol B.S.)	1.89	0.10	0.00	0.10	16.70	0.20
CO (ppm.)	7.00	0.00	6.10	0.00	8.50	0.00
H ₂ S (ppm.)	16.00	81.00	12.00	135.00	0.00	230.00
Flujo (m ³ /h)	3.45	ND	3.20	ND	ND	ND
Temperatura (°C)	34.39	34.90	34.60	35.80	20.95	31.30
Poder calorífico (BTU)	8.15	ND	25.00	ND	ND	ND

ND, No detectado; NQ, No cuantificable

Conforme a los valores de CH₄ es recomendable que se considere el aprovechamiento energético o al menos el mantener los pozos encendidos para reducir las emisiones de este gas a la atmósfera.

3. REPORTE TÉCNICO DE LA EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LAS CELDAS SELECCIONADAS

Antes de realizar la evaluación de las celdas de estudio, se identificaron las principales actividades por medio de visitas periódicas al RESA y se recabó información histórica de las mismas, entre esta información destaca que los trabajos de Excavaciones para la C4 iniciaron en marzo 2012, las obras para Captación de lixiviados, de Drenaje y Control Pluvial arrancaron a mediados de 2012, y la Impermeabilización con Geomembrana y Construcción de Pozos de Venteo iniciaron en octubre del mismo año, de manera que la operación de la misma comenzó en enero de 2013 y se proyectó culminar en enero de 2015. Para la C5 los trabajos antes mencionados tuvieron lugar de mediados de 2014 a mediados de 2015; iniciando la Recepción, tendido y compactado de RSU en enero de 2015.

La evaluación de las condiciones de operación de las celdas seleccionadas se realizó mediante la Lista de Verificación (LV) preparada por Díaz-Archundia (2016) y con apoyo de la información recabada de los responsables del RESA de Zinacantepec. La LV fue elaborada a partir de la Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, que entre otros puntos considera los que se listan a continuación (SEMARNAT, 2009):

- a) Proyecto Ejecutivo y Evaluación
- b) Restricción para ubicación del sitio
- c) Estudios y análisis previos para la selección del sitio
- d) Estudios y análisis previos en el sitio
- e) Estudios de generación y composición
- f) Características constructivas y operativas del sitio
- g) Clausura del sitio

El sitio recibe en promedio 650 t/d de RSU y los pepenadores (personas que realizan la separación de materiales en condiciones inadecuadas) separan aquellos residuos posibles de ser vendidos para su reciclado posterior (cartón, PET, metal, vidrio), posteriormente los RSU son compactados a 830 kg/m³ mediante un equipo marca CAT, modelo 816F.

Las C4 y C5 tienen un recubrimiento inferior que está constituido por tres capas impermeables, la primera conformada por material arcilloso con un espesor de 0.30 m compactado al 90% de la prueba Proctor, la segunda se compone de una geomembrana de polietileno de alta densidad de 1.5 mm de espesor, la tercera capa que sirve de protección a la geomembrana compuesta por 0.20 m de material arcilloso compactado al 85% de la prueba Proctor de acuerdo a la normatividad mexicana. En la C5 no se coloca cobertura diaria, sin embargo, la cobertura intermedia se coloca una vez que la terraza alcanza una altura promedio de 7 m. Los materiales utilizados en la base y superficie de cada celda (corona y taludes) son del mismo tipo de suelo del sitio (tobas arcillosas y arcillo-arenosas),

las cuales ayudan a evitar infiltraciones y dispersión de los RSU, así como la generación de malos olores y disminuye la fauna nociva.

Para el manejo de lixiviados se cuenta con cárcamos y drenes colectores que se dirigen a dos fosas. Ambas celdas tienen pozos de venteo con un radio de influencia de 25 m, los cuales están contruidos con tubos de PVC de 6 “ y están rodeados con una estructura de piedras y en la parte superior cuentan con un quemador de fierro colado para que el biogás pueda ser quemado y las emisiones no contengan CH₄, sin embargo este energético está siendo desaprovechado, ya que puede emplearse para la generación de energía eléctrica mediante turbogeneradores. En la tabla 3.1 se concentra la evaluación de ambas celdas y se detallan las áreas de oportunidad; la C4 tiene un 93% de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, mientras que la C5 solo alcanzó el 89%. Esta evaluación se realizó con el fin de mejorar en el corto plazo las condiciones de supervisión posclausura de la C4 y de operación de la C5.

Tabla 3.1 Evaluación de condiciones de operación de C4 y C5 conforme a la LV.

RUBROS	C4	ÁREAS DE OPORTUNIDAD	C5	ÁREAS DE OPORTUNIDAD
Categoría	A			
Proyecto Ejecutivo y Evaluación	100%	No encontradas	100%	No encontradas
Restricción para ubicación del sitio	100%	No encontradas	100%	No encontradas
Estudios y análisis previos para la selección del sitio	100%	No encontradas	100%	No encontradas
Estudios y análisis previos en el sitio	90%	No se determinan características estratigráficas	90%	No se determinan características estratigráficas
Estudios de generación y composición de lixiviados	80%	No se realiza balance hídrico del lixiviado	80%	No se realiza balance hídrico del lixiviado
Características constructivas y operativas del sitio	80%	No garantiza la extracción captación y conducción del biogás, no cuenta con área de emergencia, fauna nociva, los residuos no se cubren de forma continua, se conoce parcialmente el grado de estabilización de los residuos y no cuenta con un manual y procedimiento de operación	65%	No garantiza la extracción, captación y conducción del biogás, no cuenta con área de emergencia, fauna nociva, los residuos no se cubren de forma continua, se desconoce el grado de estabilización de los residuos y no cuenta con un manual y procedimiento de operación
Clausura del sitio	95%	No cuenta con programa de monitoreo de biogás y lixiviados posclausura	90%	No cuenta con programa de monitoreo de biogás y lixiviados posclausura
Cumplimiento %	93%		89%	

4. REPORTE DE ESTANCIA DE INVESTIGACIÓN

Gracias a la colaboración que se tiene con la Dra. Amaya Lobo García de Cortazar en la REDISA (Red de Ingeniería de Saneamiento Ambiental) y a la participación de ésta en el Proyecto de Investigación "UBICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS INTERMUNICIPALES FUTUROS EN EL ESTADO DE MÉXICO Y ESTADOS ALEDAÑOS", aprobado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) con clave 263315, del cual la profesora en Periodo Sabático es la Responsable Técnico; la Dra. Lobo García de Cortazar elaboró una invitación (Anexo A) para una Estancia de investigación en el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria en Santander, España, para el período del 01 de Mayo al 5 de Julio del 2017.

La profesora en Periodo Sabático realizó las gestiones de COMEXTRA (Anexo B) y realizó la Estancia de Investigación, que tuvo entre sus objetivos su capacitación en el programa de simulación MODUELO 4.0, para así poder trabajar en simulación con la generación de biogás y lixiviados bajo el escenario actual de operación de dos celdas tipo RESA (C4 y C5), y a diferentes tasas de recirculación en dos celdas tipo Biorrelleno (Bio-RESA). En la tabla 4.1 se presenta el Cronograma propuesto del Plan de trabajo original.

Tabla 4.1 Cronograma de actividades propuesto para la Estancia de Investigación en la Universidad de Cantabria

Actividades	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
1. Capacitación sobre requerimientos y operación del simulador MODUELO 4.0									
2. Creación de los modelos morfológico, de residuos y meteorológico									
3. Simulación con MODUELO 4.0 de la generación de biogás y lixiviados de dos celdas tipo RESA									
4. Simulación con MODUELO 4.0 de la generación de biogás a diferentes tasas de recirculación en dos celdas tipo Bio-RESA									
5. Evaluación técnico-ambiental de los escenarios simulados									
6. Elaboración de informe									

Dicho Plan de trabajo fue ajustado debido a que no se contó con toda la información de campo en el tiempo requerido, quedando el cronograma como se muestra en la tabla 4.2. Durante la estancia se participó en el VII Simposio

Iberoamericano en Ingeniería de Residuos: hacia una Economía Circular, la cual tuvo lugar en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria los días 13 y 14 de junio del año en curso, mediante la ponencia “Biodegradación acelerada anaeróbica y aeróbica de residuos sólidos urbanos en biorreactores escala laboratorio” (Anexo C), se colaboró en la organización y desarrollo del evento y se participó en los trabajos de la REDISA del 11 al 16 de junio 2017.

Tabla 4.2 Cronograma de actividades de la Estancia de Investigación

Actividades	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
1. Capacitación sobre requerimientos y operación del simulador MODUELO 4.0									
2. Creación de los modelos morfológico y de residuos de C4 y C5									
3. Creación de los modelos meteorológicos									
4. Simulación con MODUELO 4.0 de la biodegradación de los RSU de la C4									
5. Participación en el VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos									
6. Sintonización de Moduelo 4.0 para la generación de biogás con recirculación de lixiviados									
7. Elaboración de informe									

Se logró la capacitación de la Profesora en Periodo Sabático en Moduelo 4.0, que es un programa de computadora, cuyo propósito general es la simulación de vertederos o RESA como herramienta para el diseño, diagnóstico y seguimiento de vertederos de RSU. La versión Moduelo 4.0 es una versión renovada, que se basada en los modelos incluidos en las versiones anteriores Moduelo 2.0 y Moduelo 3.0; donde se han optimizado los algoritmos de cálculo y programado en una nueva plataforma, lo que facilita el empleo del programa por parte del usuario, así como su desarrollo y adaptación futuros.

4.1 Modelo de simulación

Moduelo 4.0 se basa en una representación tridimensional del RESA, formada por capas compuestas por celdas que se van activando a lo largo de la simulación según el historial/plan de explotación (López, 2013). El modelo de simulación se crea combinando cuatro submodelos de distinto tipo, que el usuario define de manera independiente:

- Modelo morfológico del vertedero
- Modelo meteorológico
- Modelo de producción de residuos
- Modelo de almacenamiento de lixiviados

a) Modelo Morfológico. Primeramente se construyó el Modelo Morfológico, para lo cual se utilizó del plano tridimensional de los vasos de las C4 (Figura 4.1) y C5 (Figura 4.2) del RESA de Zinacantepec, proporcionado por la empresa MASERA S.A. de C.V. en AutoCAD, las cuales se cargaron y discretizaron en el simulador (Figuras 4.3 y 4.4). Cabe mencionar que se requirió ajustar uno a uno los cubos que representan un volumen del terreno establecido, con dimensiones 5x5x2 m. A estos cubos se les denomina celdas (UC, 2016). Las medidas de las C4 y C5 se listan en la tabla 4.1.

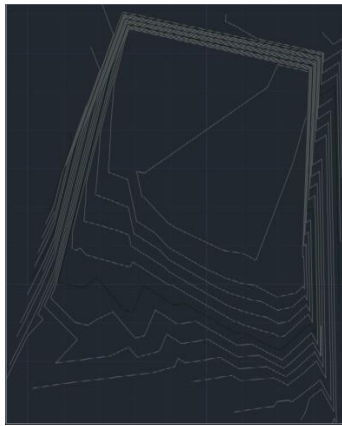


Figura 4.1 Plano del vaso de C4

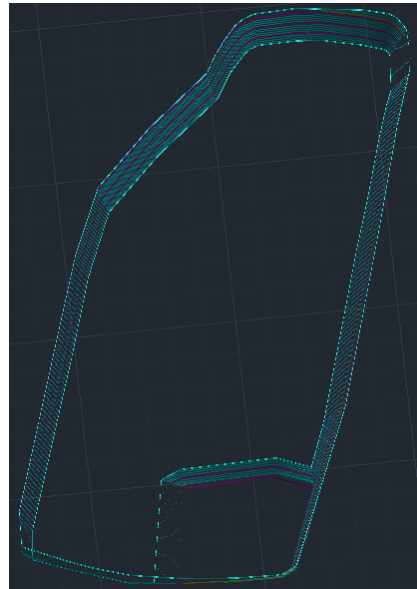


Figura 4.2 Plano del vaso de C5

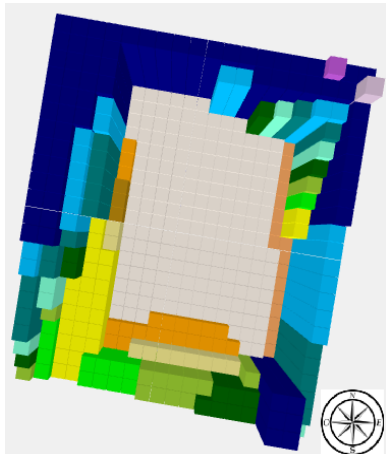


Figura 4.3. Modelo del vaso C4

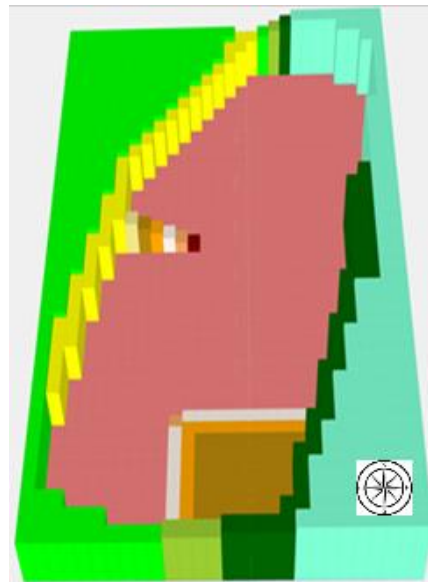


Figura 4.4. Modelo del vaso C5

Tabla 4.1 Dimensiones de los modelos morfológicos

DIMENSIONES DE LOS VASOS DE VERTIDO	C4 (m)	C5 (m)
Altura Noreste	27.00 (28)	18.00
Altura Noroeste	24.00	10.00
Altura Sureste	19.00 (20)	17.00
Altura Suroeste	18.00 (26)	18.00
Longitud superior Norte	60.36 (56)	39.44
Longitud superior Sur	70.34 (64)	82.82
Longitud superior Este	90.13 (92)	167.72
Longitud superior Oeste	90.13 (90)	107.68d
Longitud inferior Norte	50.96 (52)	33.69
Longitud inferior Sur	63.53 (64)	76.82
Longitud inferior Este	81.62 (82)	160.47
Longitud inferior Oeste	82.43 (82)	102.88

Posteriormente se colocaron los pozos en el Modelo del vaso discretizado y la tubería de lixiviados en el lado Este de la C4 (Figura 4.5). Una vez que se contó con información de campo sobre el llenado con RSU, se procedió a colocar las celdas definidas como RSU sin cobertura, iniciando en la esquina Noreste de la C4 (Figura 4.6).

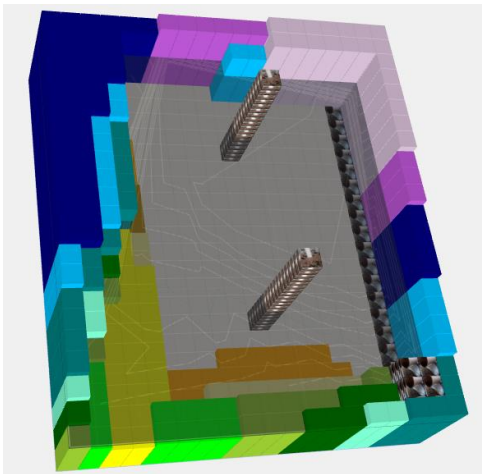


Figura 4.5 Colocación de pozos y tubería de lixiviados a fosa 3

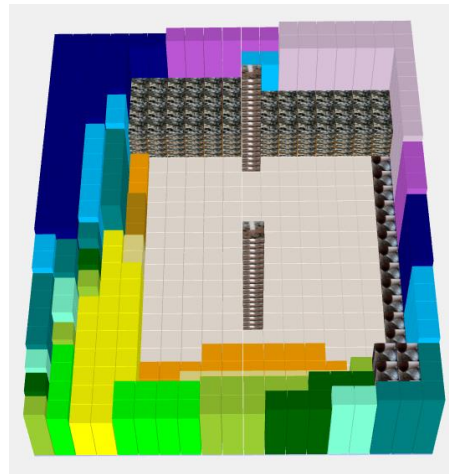


Figura 4.6 Inicio de operación de C4 con colocación de RSU

Para la C5 la operación del llenado se llevó a cabo de norte a sur hasta el banco y posteriormente de sur a norte, realizando la disposición de la parte alta a la más baja, de manera que los equipos de compactación trabajaran a favor de la pendiente y nunca hacia arriba por cuestión de consumo de combustible (Bagchi, 2004). El modelo del terreno de C5 está conformado por 12 capas en la parte más alta (Este, color verde agua, 24m) y 9 capas en la parte más baja (Oeste, color verde, 18m). Al sureste se presenta un banco de piedra que de

acuerdo con el terreno real tiene una altura de 6 m, mientras que en el oeste se aprecia el camino utilizado para el descenso de los camiones de vertido (Figura 4.4).

Entre las herramientas de MODUELO 4.0 se tiene el poder rotar los modelos tridimensionales a simular y colocar con diferentes colores o símbolos las celdas a utilizar, lo cual ayuda visualmente a la persona que construye la celda (Figura 4.7). También es posible realizar cortes a la celda que se pretende construir (Figura 4.8). En la tabla 4.2 se presentan los diferentes tipos de celdas, como son las celdas con RSU contenidos en el vaso, con RSU y una capa de material de cobertura que alcanzan el nivel del suelo (llenado del vaso) y los RSU que se disponen encima de la primera capa de cobertura (suelo), es decir, aquellos que forman los bancos y corona; las celdas de recolección comprenden las asignadas a la ubicación de pozos de inyección lixiviado y las de clausura que contienen 1.4 m de altura de RSU y 0.60 m de material final de cobertura (sellado).

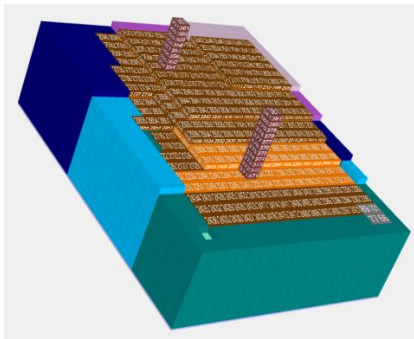


Figura 4.7 C4 con rotación

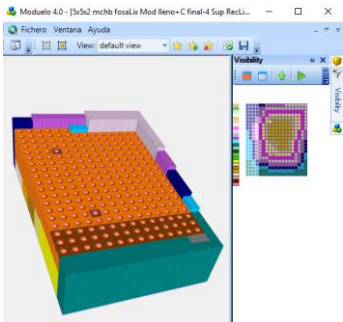


Figura 4.8 Corte de C4

Tabla 4.2 Características de las celdas para el Modelo morfológico de Moduelo 4.0

TIPO DE CELDA	SÍMBOLO
Celdas de disposición de RSU	 sin cobertura
	 con cobertura
	 superficiales
Celdas de recolección	 de Biogás
	 de Lixiviado
Celdas de clausura de sitio de disposición	 Material final de Sellado

Cabe mencionar que las celdas de RSU con cobertura contienen 1.85 m de RSU para la C4 y 1.80 m para C5, lo que significa que contienen 0.15 m y 0.20 m de material de cobertura respectivamente.

- b) Modelo Meteorológico. Para simular los procesos hidrológicos, de biodegradación y asentamiento a lo largo del tiempo fue necesario elaborar el Modelo Meteorológico. Fue necesario recurrir a información meteorológica de la zona donde se ubica el RESA de Zinacantepec y preparar en Excell un archivo denominado “MetereologicalRecords”, con información diaria de 1989 al 2030 de Humedad relativa, Temperatura promedio, Velocidad del viento, Insolación o luminosidad, Precipitación por hora y diaria, para lo cual se definieron los distintos parámetros de los modelos hidrológicos, y Temperatura máxima y mínima (Tabla 4.3). También fue necesario definir Valores de parámetros para los Modelos hidrológicos, que corresponden a: Modelo de infiltración superficial, Modelo de evapotranspiración, Modelo de escorrentía superficial, Modelo de flujo preferencial y Modelo de humedad residual. En la tabla 4.4 se presentan los valores de los parámetros considerados para cada tipo de celda.

Tabla 4.3 Ejemplo del archivo “MetereologicalRecords”.

Date	Relative Humidity	Average Temperature	Average WindSpeed	Insolation	PH1	PH2	PH24	Daily Precipitation	Maximum Temperature	Minimum Temperature
19890101	62.21	10.40	0.60	6.90	0.00	0.00	0.00	0.00	22.00	-1.20
19890102	32.90	9.60	1.29	5.10	0.00	0.00	0.00	0.00	20.4	-1.2
19890103	57.46	10.00	0.43	6.85	0.00	0.00	0.00	0.00	22.2	-2.2
20301229	42.88	14.20	6.10	6.60	0.00	0.00	0.00	0.00	20.40	8.70
20301230	37.81	14.40	8.00	4.25	0.00	0.00	0.00	0.00	21.80	8.90
20301231	33.67	14.10	5.30	6.50	0.00	0.00	0.00	0.00	21.70	7.80

Tabla 4.4 Valores de parámetros aplicados al modelo hidrológico

TIPO DE CELDA	Velocidad de Infiltración mínima (mm/h)	Velocidad de Infiltración máxima (mm/h)	Parámetro de Horton (1/h)	Profundidad de Evaporación (m)	Punto de Marchitez (%)	Máxima acumulación en superficie (m)	Canales preferenciales (%vol)	Humedad Residual Mínima de RSU (%)
Sin Cobertura	10.00	150.00	4.14	0.30	100.00	0.200	30.00	5.00
Con Cobertura	1.00	50.00	4.14	0.30	100.00	0.050	30.00	5.00
Superficiales	10.00	150.00	4.14	0.30	100.00	0.050	30.00	5.00
Cond. Biogás	25.00	140.00	4.14	0.00	100.00	0.000	0.00	0.00
Cond. Lixiviados	25.00	140.00	4.14	0.00	100.00	0.000	0.00	0.00

- c) Modelo de producción de residuos. Para el Modelo de generación de residuos se elaboraron los distintos tipos de celdas que podría haber en el RESA para las celdas, correspondiente a los RSU que se vierten en el RESA a lo largo de su historial de operación.

Existen cinco modelos de simulación con distintos datos y requerimientos, por lo que se comparó la información de vertido con la que se contaba y se seleccionó el modelo que más se ajustaba, el cual correspondió a “Generación Mensual

Global”. En la figura 4.9 se presenta la ventana con las opciones que despliega “Waste Generation Models” de Moduelo 4.0 y en la figura 4.10 los cuatro periodos de generación de RSU, correspondientes a las épocas de estiaje y lluvias de 2013, 2014 y primer mes de 2015.

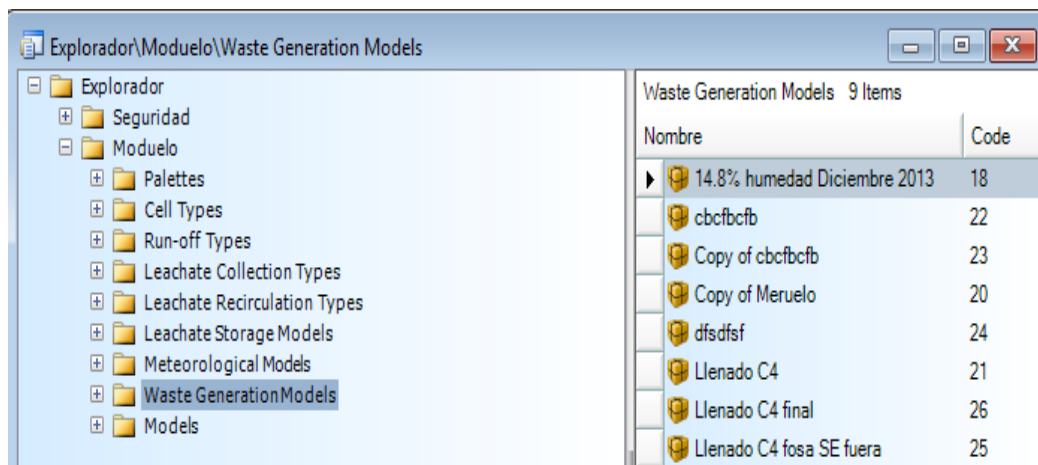


Figura 4.9 Ventana de “Waste Generation Models” de Moduelo 4.0.

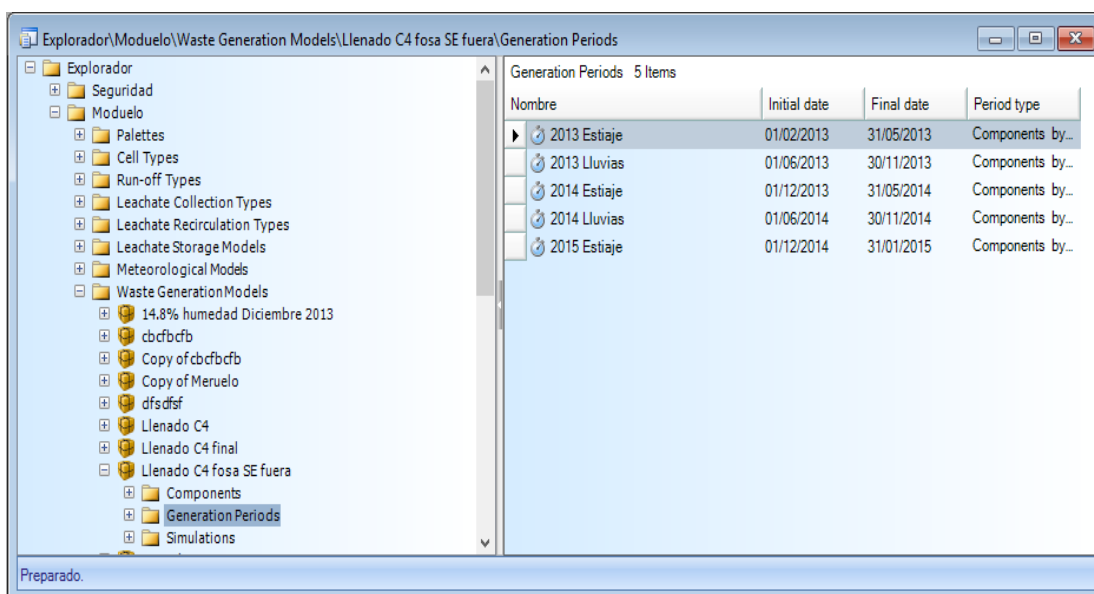


Figura 4.10 Ventana con periodos de llenado de RSU de C4.

En la figura 4.11 se presentan en orden las ventanas que requiere Moduelo 4.0 para definir las características de la celda y los modelos hidrológico y de biodegradación que se van a utilizar; en este caso se eligió como ejemplo la celda de RSU sin cobertura.

ZN1-RSU_SinCob

General | Cell characteristics | Hydrological model | Biodegradation model | MH Curve | Other models

Code: 34

Base type: Landfill

Name: ZN1-RSU_SinCob

Description:

Base color: 255, 128, 0

Acceptar Cancelar Aplicar

ZN1-RSU_SinCob

General | Cell characteristics | Hydrological model | Biodegradation model | MH Curve | Other models

Waste characteristics

Initial residual moisture (% wet weight): 12.00

Initial field capacity (% wet weight): 27.00

Initial saturation moisture (% wet weight): 60.00

Initial vertical hydraulic conductivity (m/s): 2E-05

Initial horizontal hydraulic conductivity (m/s): 2E-05

Cover characteristics

Cover thickness (m): 0.00

Initial moisture content (% wet weight): 27.00

Initial density (kg/m3 wet weight): 1400

Initial residual moisture (% wet weight): 26.00

Initial field capacity (% wet weight): 27.00

Initial saturation moisture (% wet weight): 27.00

Initial vertical hydraulic conductivity (m/s): 2E-07

Acceptar Cancelar Aplicar

ZN1-RSU_SinCob

General | Cell characteristics | Hydrological model | Biodegradation model | MH Curve | Other models

Surface infiltration model

Minimum infiltration rate (mm/h): 10.00

Maximum infiltration rate (mm/h): 150.00

Horton parameter (1/h): 4.14

Evapotranspiration model

Evaporation depth (m): 0.30

Wilting point (%): 100

Run-off model

Maximum surface accumulation (m): 0.200

Preferential flow model

Fraction of volume affected by preferential channels (%): 40

Ratio preferential/homogeneous flow hydraulic conductivity: 100.00

Residual moisture model

Minimum residual moisture of waste (% wet weight): 5.00

Influence of load on the residual moisture (kg/m2): 4536

Acceptar Cancelar Aplicar

ZN1-RSU_SinCob

General | Cell characteristics | Hydrological model | Biodegradation model | MH Curve | Other models

Readily hydrolysis activation time (d): 0

Slowly hydrolysis activation time (d): 100

Methanogenesis activation time (d): 365

Ready hydrolysis rate (d-1): 0.0025

Slowly hydrolysis rate (d-1): 0.00013

Acetogenesis rate (d-1): 0.03

Acetoclastic methanogenesis rate (d-1): 0.19

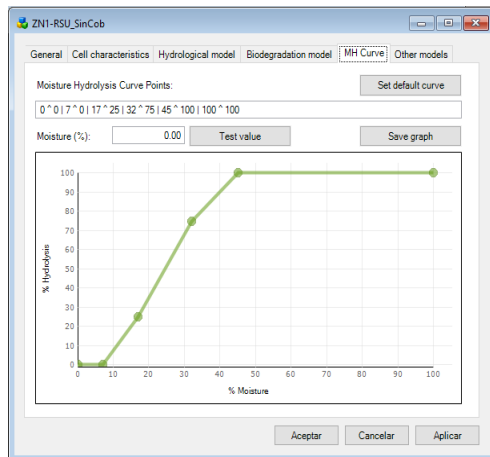
Hydrogenophilic methanogenesis rate (d-1): 160

Fraction of carbon transformed into intermediate compounds in the hydrolysis: 0.76

Fraction of carbon transformed into acetate in the hydrolysis: 0.2

Fraction of carbon transformed into acetate in the acetogenesis: 0.68

Acceptar Cancelar Aplicar



ZN1-RSU_SinCob

General | Cell characteristics | Hydrological model | Biodegradation model | MH Curve | Other models

Temperature model

Specific heat capacity (J/kg°C): 1700

Thermal conductivity (J/m/s°C): 6

Oxygen uptake rate (molO2/kg dry mass/h): 0.030

Aerobic heat generation ratio (J/molO2): 460000

Anaerobic heat generation ratio (J/molCH4): 45000

Thickness of waste compaction lift (m): 1.0

Time interval between lifts (h): 10

Settlement model

Compression ratio: 0.20

Mass-loss to settlement ratio: 0.264

Acceptar Cancelar Aplicar

Figura 4.11 Ventanas de la cerda Residuos sin cobertura.

En la figura 4.12 se muestra la ventana que tiene MODUELO 4.0 para definir otros modelos, como el modelo de asentamiento.

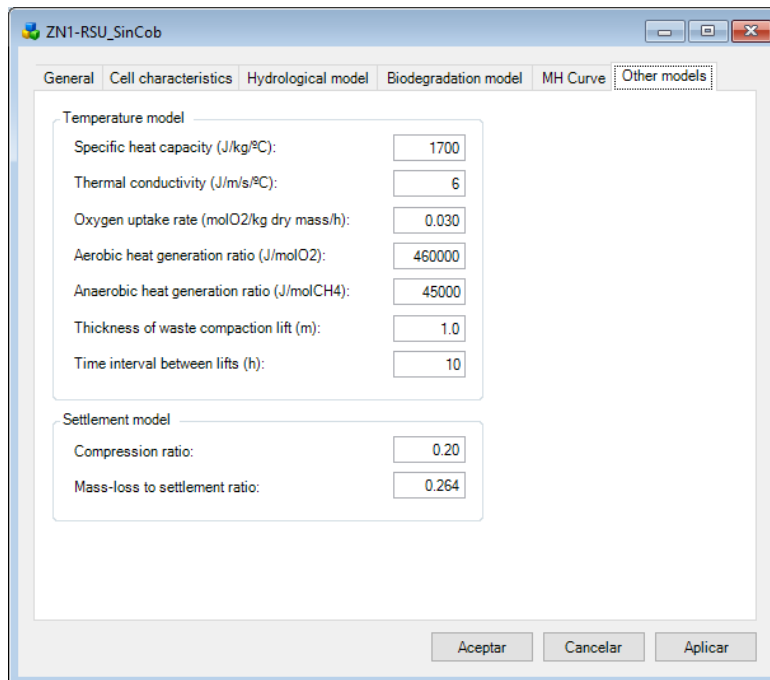


Figura 4.12 Otros modelos para la C4.

d) Modelo de almacenamiento de lixiviados. Para este modelo se definieron tres tipos de modelos de almacenamiento de lixiviados. Los tipos de modelos de almacenamiento de lixiviados se muestran en la figura 4.13 y en la figura 4.14 las celdas con conducción de lixiviados.

The screenshot shows the 'Explorador/Modulo/Leachate Storage Models' window. It displays a list of three leachate storage models in a table format. The table has columns for Nombre, Code, Initial date, Final date, Storage capacity, Horizontal surface, Rainwater considered, and Evaporat. The data is as follows:

Nombre	Code	Initial date	Final date	Storage capacity	Horizontal surface	Rainwater considered	Evaporat
Balsa lixiviados hasta 2030	4	01/01/2006	31/12/2030	10000000	700	Yes	No
Balsa Zina	6	01/02/2013	31/12/2050	10000	100	Yes	Yes
Fosa Lix SE C-4	5	01/02/2013	31/01/2031	188	52	Yes	Yes

Figura 4.13. Tipos de modelos de almacenamiento de lixiviados.

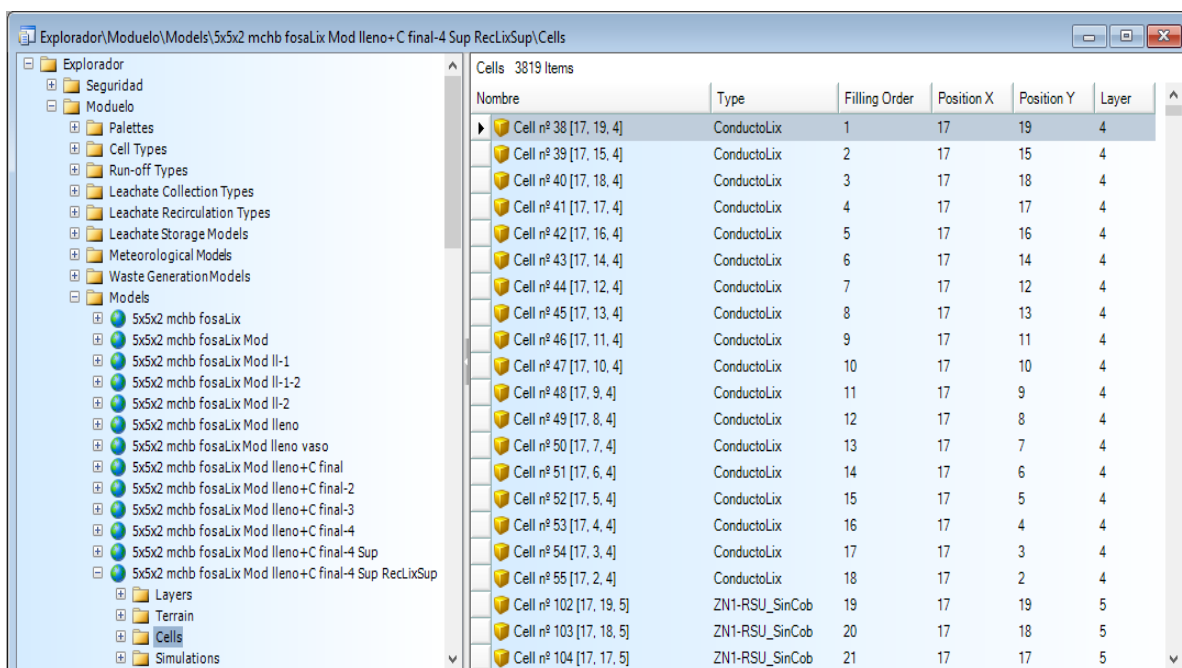


Figura 4.14 Celdas con conducción de lixiviados en C4

En la tabla 4.5 se muestran las características empleadas para los depósitos de almacenamiento de lixiviado para su colección, los cuales se emplearon en los casos de recirculación Superficial (RS) y en Pozos (RP) para las simulaciones con Modulo 4.0

Tabla 4.5 Propiedades de los depósitos de almacenamiento

PARÁMETRO	VALOR
Promedio de velocidad de evaporación	Cálculo automático del simulador
Tasa de sedimentación (1/d)	0.10
Fracción sedimentable (%)	1.00
Velocidad de degradación a los 10º o más (1/d)	0.10
Coeficiente de Arrhenius	0.10

En el Modelo Morfológico se indicaron una a una las celdas que permiten o no infiltraciones, así como los dos pozos de la C4 y las fosas de lixiviados, dimensionadas de acuerdo a la información de campo proporcionada por la empresa MASERA (Figura 4.15).

En la figura 4.16 se muestra la C4 con material de cobertura final con un corte, el cual permite verificar que el Pozo 26 se encuentra desplantado desde la base; también pueden apreciar las celdas de RSU sin cobertura dentro del vaso (color naranja) y las celdas de RSU sin cobertura de la corona (color beige), así como las celdas con cobertura intermedia de 15 cm de suelo (color café) y las

de cobertura final (color verde olivo). La figura 4.17 presenta la C4 ya completa y lista para la simulación de generación de biogás y lixiviados.

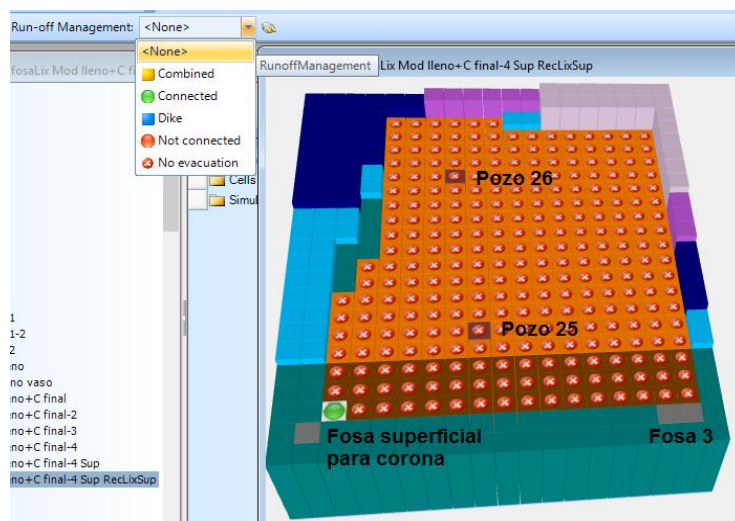


Figura 4.15 Panel de opciones para indicar Celdas conectadas en C4.

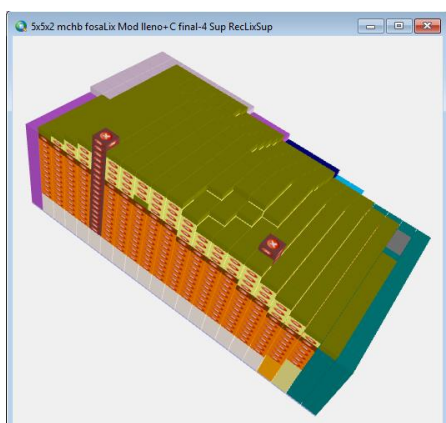


Figura 4.16 C4 con corte longitudinal

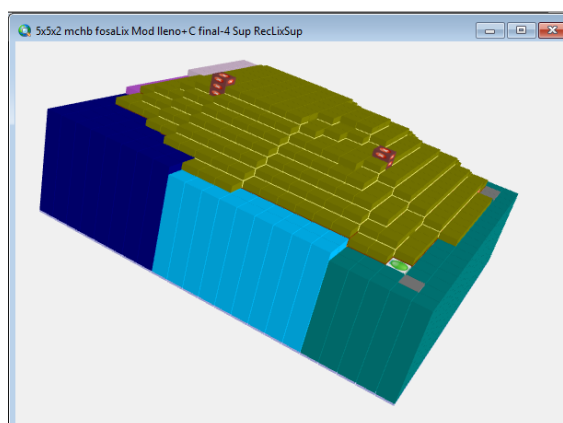


Figura 4.17 Vista Oeste de C4 completa

4.2 Sintonización de Moduelo 4.0

Con los datos proporcionados por personal de MASERA, la Dra. Ana López de la Universidad de Cantabria y el Ing. Diego Santana Rodríguez del Instituto Tecnológico de Toluca; se calibraron las constantes de infiltración superficial, evapotranspiración superficial, escorrentía, flujo preferencial, humedad residual y las tasas de degradación.

Para la sintonización se utilizó la cantidad de lixiviado acumulado en un periodo de operación de 30 años En la figura 4.18 se muestra la cantidad real de lixiviado

acumulado (línea punteada azul) y la cantidad simulada por Moduelo 4.0 (línea continua en amarillo); donde la dinámica de lixiviado acumulado simulado presenta una tendencia ascendente y distante, mostrando al año 15 el valor más alejado, sin embargo, al final del periodo de operación el valor acumulado es próximo al real.

También se consideró Demanda Química de Oxígeno (DQO) como un parámetro de calibración para la degradación de RSU. En la figura 4.19 se presentan las dinámicas real (línea azul) y simulada (línea amarilla) de DQO; donde la dinámica real muestra mayor proximidad durante el periodo de operación que el lixiviado acumulado.

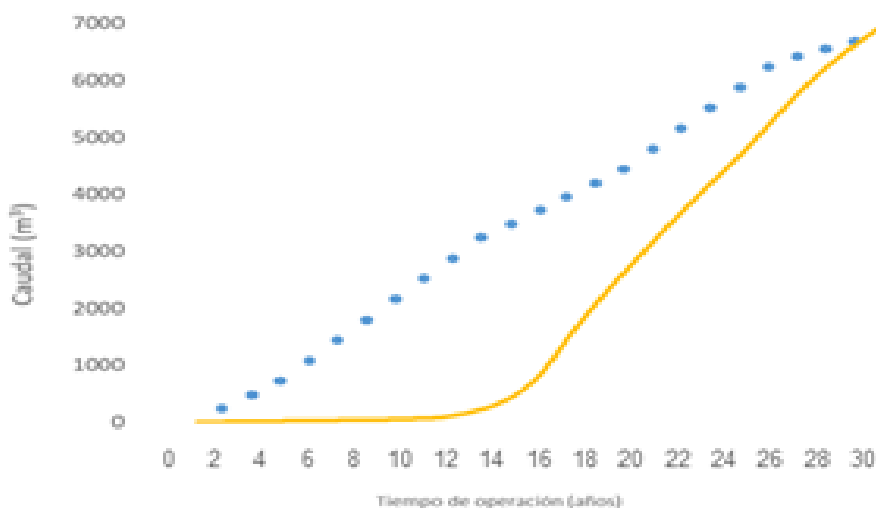
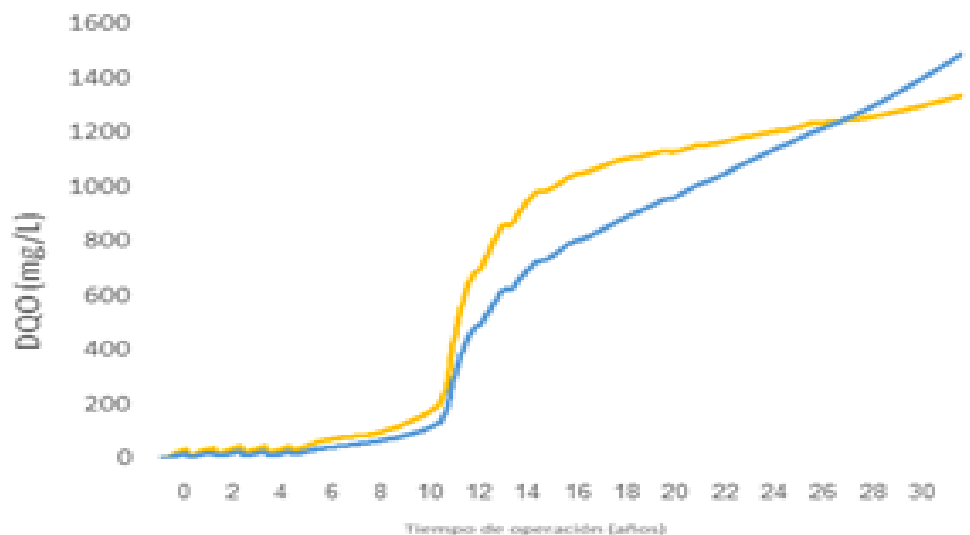


Figura 4.18 Calibración de constantes mediante lixiviado acumulado



4.19 DQO en lixiviados para sintonización

Los valores de las constantes se presentan en la tabla 4.6, los cuales fueron utilizados para las simulaciones en las diferentes celdas de los RSU dispuestos y materiales de cobertura.

Tabla 4.6 Constantes empleadas en Modulo 4.0

CONSTANTE / CELDA	SIN COBERTURA	CON COBERTURA	SUPERFICIALES	SELLADO
Infiltración mínima (mm/h)	3.81	3.81	3.81	10
Infiltración máxima (mm/h)	76.2	76.2	76.2	150
Parámetro de Horton (1/h)	4.14	4.14	4.14	4.14
Profundidad de evaporación (m)	0.1	0.1	0.1	0.1
Punto de marchitez (%)	100	100	100	100
Acumulación superficial máxima (m)	0.2	0.05	0.05	0.05
Canales preferenciales (%)	35	35	45	45
Humedad residual mínima (%Hbh)	5	5	5	5
Carga de humedad residual (kg/m ²)	4536	4536	4536	4536
Tasa de hidrólisis rápida (1/d)	0.1	0.1	0.1	0.1
Tasa de hidrólisis lenta (1/d)	0.01	0.01	0.01	0.01
Tasa de acetogénesis (1/d)	0.1	0.1	0.1	0.1
Tasa de metanogénesis acetoclástica (1/d)	0.7	0.7	0.7	0.7
Tasa de metanogénesis hidrogenofílica (1/d)	500	500	500	500

5. REPORTE DE LAS SIMULACIONES CON MODUELO 4.0

Una vez modeladas las C4 y C5 del RESA de Zinacantepec (para un llenado por dos años) y calibradas las constantes a utilizar, se llevaron a cabo las simulaciones con Moduelo 4.0 en un periodo comprendido del 2020 al 2050 (30 años), bajo los escenarios de operación tradicional o tumba seca (Sin Recirculación, SR) y de biodegradación acelerada como Bio-RESA, utilizando Recirculación de lixiviados en Superficie (RS) y Pozos verticales (RP).

En la tabla 5.1 se listan dichos escenarios, donde conforme a la información proporcionada por MASERA; la recirculación de lixiviados se realizó a dos tasas mediante una Pipa de 16 m³, iniciando el año 3 con 14 y 42 m³/semana en las C4 y C5 respectivamente.

Tabla 5.1 Escenarios de operación y simulaciones

No.	SIMULACIÓN	RSU DIS- PUESTOS (t)	LIXIVIADOS RECIRCULADOS (m ³ /d)	(m ³ /mes)
1	C4 Sin Recirculación	174,727	0.0	0.0
2	C4 Recirculación Superficial	174,727	2.0	60.8
3	C4 Recirculación en Pozos	174,727	2.0	60.8
4	C5 Sin Recirculación	408,816	0.0	0.0
5	C5 Recirculación Superficial	408,816	6.0	182.4
6	C5 Recirculación en Pozos	408,816	6.0	182.4

Con los resultados de las simulaciones se elaboraron las dinámicas de producción de biogás y lixiviados. En las figuras 5.1 y 5.2 se presentan las dinámicas de CH₄ para C4 y C5, que corresponde al 50 % volumen del biogás generado.

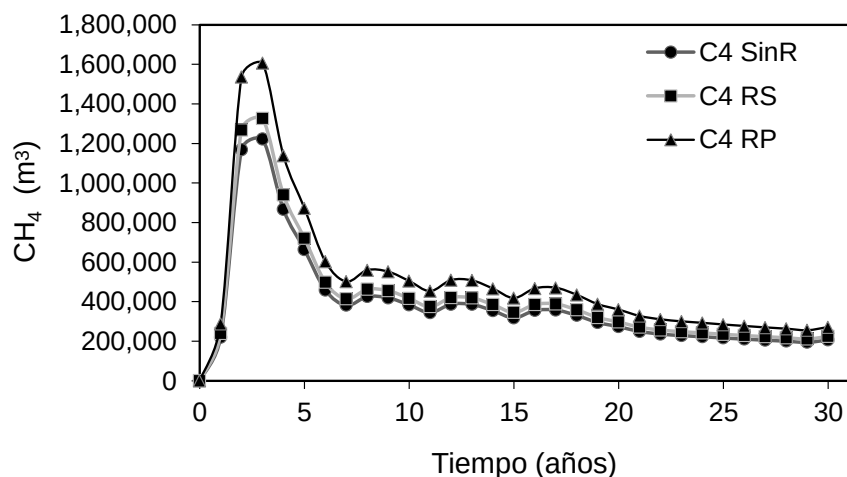


Figura 5.1 Generación de CH₄ en C4 sin y con recirculación de lixiviados

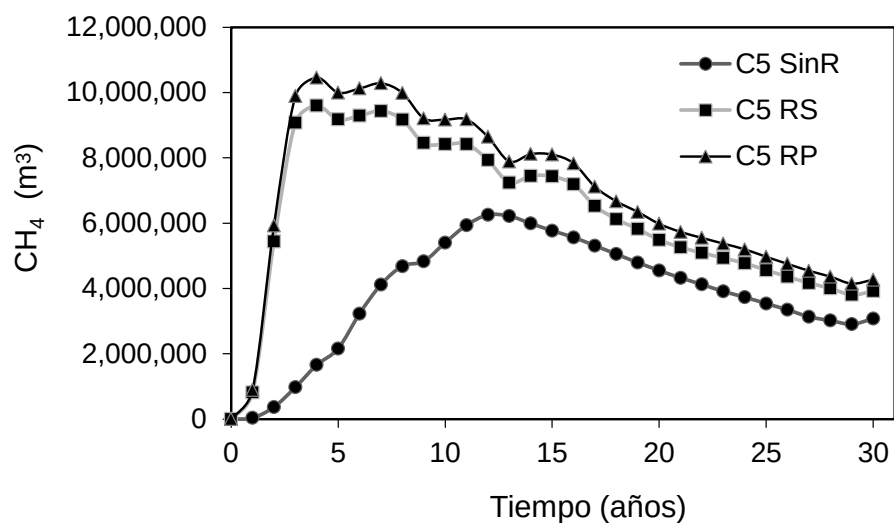


Figura 5.2 Generación de CH₄ en C5 sin y con recirculación de lixiviados

Como puede apreciarse en las figura 5.1 y 5.2, las mayores tasas de generación de CH₄ se tuvieron los primeros 3 a 5 años, presentando primero una tendencia ascendente y posteriormente decaimiento, lo cual puede atribuirse a la falta de distribución de los nutrientes por estancamiento, al descenso de la carga orgánica de los lixiviados o por la formación de canales preferenciales (Sánchez-Gómez, 2006; Valencia, 2008).

En la tabla 5.2 se resumen la generación obtenida para 30 años de los diferentes escenarios, así como el porcentaje adicional a tumba seca (SR) que se obtendría de CH₄, operando cada celda como Bio-RESA, si se recircularán lixiviados como se realizaron las simulaciones respectivas.

Tabla 5.3 Generación de CH₄ en 30 años bajo escenarios simulados

No.	SIMULACIÓN	LIXIVIADOS RECIRCULADOS (m ³ /d)	GENERACIÓN TOTAL DE CH ₄		
			(m ³)	(% ADICIONAL)	(m ³ / t RSU)
1	C4 Sin Recirculación	0.0	11,782,040	--	67.43
2	C4 Recirculación Superficial	2.0	12,795,095	8.60	73.23
3	C4 Recirculación en Pozos	2.0	15,499,073	31.55	88.70
4	C5 Sin Recirculación	0.0	118,051,833	--	288.77
5	C5 Recirculación Superficial	6.0	193,366,478	63.80	472.99
6	C5 Recirculación en Pozos	6.0	210,695,402	78.48	515.38

La mayor generación de CH₄ y biogás ocurre en ambas celdas cuando es con RP de lixiviados (Figuras 5.2 y 5.3); con 1,606,826 m³ para la C4 en el año 3 y 10,456,719 m³ para la C5 en el año 4 de operación. La tabla 5.3 muestran las generaciones de CH₄ y lixiviados para el escenario de RP, el cual se eligió como el más favorable para los fines de este trabajo, pues si bien en ambos tipos de recirculación de lixiviados se incrementa sustancialmente la generación de este gas, en la C4 se obtiene el 31.55% y en la C5 el 78.48% adicional de CH₄, que cuando se opera como tumba seca.

Tabla 5.3 Generaciones según simulación con recirculación en pozos

AÑO	C4 (m ³ /año)		C5 (m ³ /año)	
	CH ₄	LIXIVIADOS	CH ₄	LIXIVIADOS
1	288710.8	0.0	889141.8	0.0
2	1536100.0	0.0	5926871.9	0.0
3	1606825.9	108.4	9887622.8	254.6
4	1139150.3	2367.6	10456719.0	5551.9
5	873206.0	2249.0	9996846.0	5273.8
6	603251.7	3701.2	10122689.3	8679.1
7	502112.5	3603.6	10281711.2	8450.3
8	559894.0	3558.6	9989175.0	8344.7
9	551916.3	3690.3	9210798.7	8653.4
10	504674.7	3858.4	9169580.0	9047.5
11	453578.2	3823.8	9177171.6	8966.6
12	509422.3	3775.3	8641440.6	8852.8
13	507828.8	3760.2	7889821.7	8817.4
14	466343.7	3751.0	8115631.2	8795.7
15	418627.4	3747.1	8099341.4	8786.7
16	467517.9	3755.8	7833356.9	8807.2
17	470768.7	3673.3	7113222.4	8613.7
18	434770.9	2997.0	6668985.0	7027.7
19	387788.0	2942.9	6342665.3	6900.9
20	360174.0	2927.6	5979224.3	6865.2
21	328007.0	2879.5	5732049.3	6752.3
22	311003.4	2862.7	5550101.1	6712.8
23	300668.9	2846.1	5374414.0	6674.0
24	293215.6	2823.0	5199179.0	6619.7
25	284809.5	2664.3	4971053.3	6247.7
26	277394.9	2270.8	4753621.8	5324.9
27	270093.5	1457.4	4541687.4	3417.6
28	263602.1	912.5	4363443.3	2139.9
29	255825.3	815.3	4148564.1	1912.1
30	271790.9	859.9	4269272.1	2016.8

6. REPORTE DE EVALUACIONES DE CELDAS TIPO BIO-RESA

Conforme a los resultados de las simulaciones de los seis escenarios, la operación de las C4 y C5 como Bio-RESA con recirculación de lixiviados en pozos fue la que produjo la mayor cantidad de CH₄, por lo que conforme a ello se realizaron las evaluaciones técnica, ambiental y económica.

6.1 Evaluación técnica

Debido a que la cantidad de CH₄ que se genera en la C4 es 13.6 veces menor que en la C5 (Figura 6.1), se decidió como proyecto a considerar el captar el biogás de ambas celdas y dimensionar un solo sistema de aprovechamiento del mismo.

Los sistemas para el aprovechamiento de biogás se dividen en tres partes: el sistema de captación, el sistema de conducción y el sistema de aprovechamiento en sí y/o un sistema de destrucción (Bagchi, 2004; INCREMI, 2013):

- a) Sistema de captación de biogás. Para este sistema se debe contar con pozos de extracción, los cuales pueden ser los dos y siete que actualmente existen en las C4 y C5 para emisión pasiva, o bien éstos podrían continuarse utilizando para recircular los lixiviados y construir otros pozos para captar el biogás; en cualquiera de los casos, se deberán realizar las adaptaciones necesarias.

Un pozo para extracción de biogás está conformado de tubería de PVC o HDPE, de 2", 4" o 6" de diámetro. Todo el tubo desde la base es ranurado (orificios alrededor del 60% de su longitud, aunque dicho porcentaje puede ser menor o mayor), para permitir el paso del biogás desde los RSU hacia el sistema de conducción. En México no se tienen criterios o regulaciones para el diseño de pozos de extracción de biogás, por lo que se consideran los criterios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA por sus siglas en inglés), y generalmente se utilizan ranuras verticales y horizontales, con áreas equivalentes que van de 8 a 16 plg²/ft (Jaramillo, 2002; Schroeder, 1994).

INCREMI (2013) reporta que el radio de influencia de un pozo puede estimarse considerando de 2.25 hasta 2.5 veces la profundidad del pozo, valores que son influenciados por la permeabilidad de los RSU y el sobre posicionamiento de los radios de influencia; esto último se utiliza para asegurar la mayor cobertura del sistema al momento de la extracción del biogás; por lo que tomando el valor conservador de 2 veces la profundidad del pozo, los pozos denominados 1 (26)

y 2 (25) de la C4 (numerados de norte a sur), que tiene respectivamente profundidades de 36 y 34 m, tendrán un radio de influencia de 72 y 68 m, lo que significa que existe una sobre posición, pues la distancia entre estos pozos es de 50 m (Figura 6.1). Los pozos de la C5 tienen una profundidad promedio de 31 m, lo que significa que tienen radios de influencia de 61 m, con lo que esquemáticamente pueden representarse como se muestra en la figura 6.2 (numerados de sur a norte).

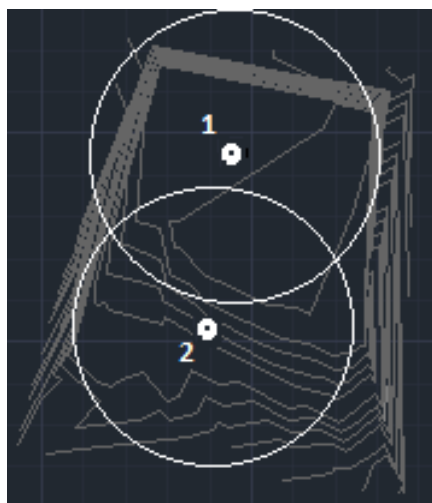


Figura 6.1 Radios de influencia de C4

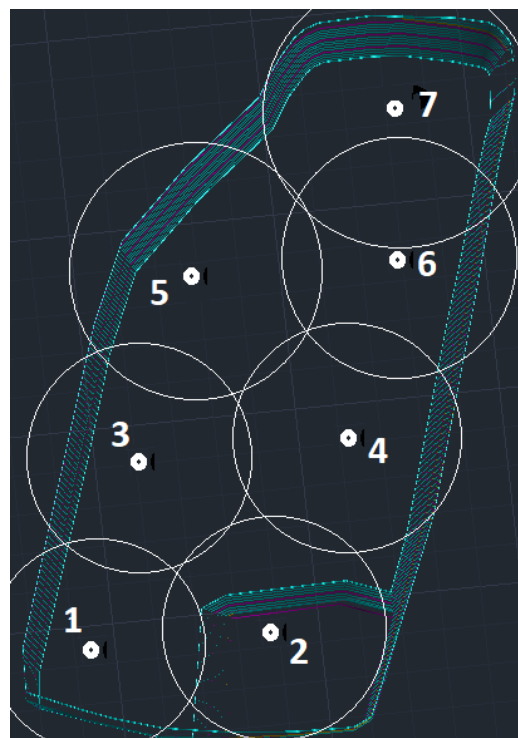


Figura 6.2 Radios de influencia de C5

Los pozos de extracción del biogás de dichas celdas están hechos con tubo de PVC de 6" de diámetro y tienen ranuras verticales, de manera que se propone un cabezal con puntos de muestreo y válvula de control cada tres pozos, además de tres trampas de condensados en el sistema, las cuales pueden contar con un cárcamo de bombeo, para drenarse instantáneamente. Por diseño se recomienda que un 20 % de los pozos cuenten con bombas de extracción de lixiviados (ICREMI, 2013), así que se sugiere un equipo de extracción dual, con una bomba para la C4 y otra para la C5, que darán servicio a los dos y siete pozos de cada celda. Como las celdas son independientes, la CA tendrá un cabezal y una trampa de condensados, mientras que la C5 contará con dos.

- b) Sistema de conducción de biogás. Para este sistema se eligió tubería de HDPE (aunque también las hay de PVC), el cual es una red de conducción que estará sobre el suelo y conforme a la colocación de los pozos y al trazado de los conductos, para la C4 se requieren de dos ramales y para C5 se sugiere un

arreglo tipo antena (Figura 6.3), requiriéndose 170 m de tubería de 4" para ramales y 350 m de tubería principal de 6".

Además se necesita de trampas de condensados para "atrapar" el vapor de agua del biogás que sale de la masa de RSU; dichos elementos se sitúan en los puntos más bajos de la red, de manera que por el efecto de la gravedad, se facilite la eliminación de los condensados, manteniendo la red libre de obstrucciones al flujo de biogás y en condiciones óptimas de funcionamiento. La tubería principal conducirá el biogás hacia el sistema de tratamiento (limpieza de humedad, H_2S , siloxanos, etc.) y posteriormente hacia la dosificación del sistema de destrucción (quemado) y al sistema de aprovechamiento (generación de energía) (Bagchi, 2004; INCREMI, 2013).

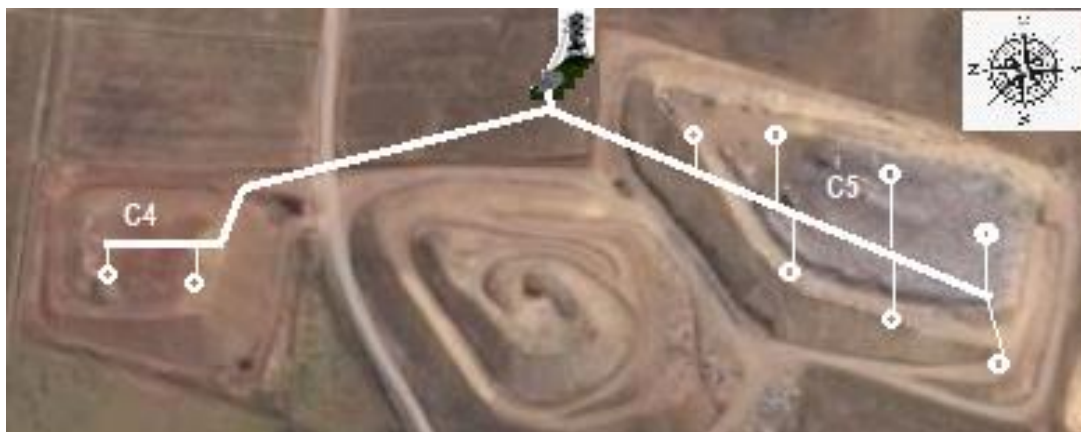


Figura 6.3 Propuesta de sistema de conducción de biogás

- c) Sistema de aprovechamiento y/o destrucción de biogás. El sistema de aprovechamiento comprende principalmente el motogenerador. De acuerdo con la máxima generación de CH_4 para las C4 y C5, se tomó como base de flujo medio de $600 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 6.4) con un 70 % de recuperación (ICREMI, 2013).

Con el flujo de $420 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{h}$ y un factor del 20% de sobrediseño se dimensionó el motogenerador requerido para convertirlo a energía eléctrica. La especificación técnica del dimensionamiento de un motogenerador tiene que ver básicamente con la potencia de energía eléctrica que es capaz de generar, para lo cual se utilizaron los criterios que se muestran en la tabla 6.1 y la ecuación 6.1, con un rendimiento térmico medio para la generación eléctrica del 33% (Blanco *et al.*, 2017; FAO, 2011; SENER, 2014).

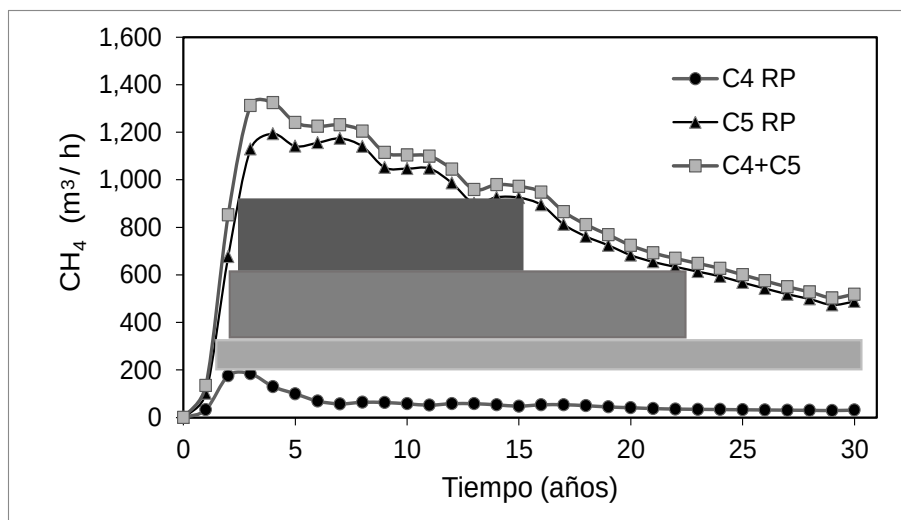


Figura 6.4 Generación baja, media y alta de CH₄

Tabla 6.1 Criterios para estimación de potencia de metano

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Poder calorífico inferior del biogás	5 ^a	Kwh/ m ³
Poder Calorífico de gas natural con 93% de CH ₄	41 041 ^b	kJ/m ³
Poder Calorífico CH ₄	44 130 ^b	kJ/m ³
	61 292 ^b	kJ/kg
	10.00 ^c	Kwh/ m ³
Densidad CH ₄	0.72 ^c	kg/m ³
Flujo CH ₄ medio (70% de recuperación)	640	m ³ /h
	2.45	kg/h

Fuente: ^{a)} Blanco *et al.*, 2017; ^{b)} SENER, 2014; ^{c)} FAO, 2011.

$$Potencia\ disponible\ [kW] = \eta t * PCI\ biogás * Q\ biogás \quad (Ec.\ 6.1)$$

Donde:

ηt : Rendimiento térmico de la generación eléctrica (Asume valores de 25, 33, y 40% para los escenarios bajo, medio, y alto, respectivamente)

PCI biogás: Poder calorífico inferior del biogás [kWh/m³]

Q biogás: Caudal de biogás capturado [m³/h] (Escenarios bajo, medio, y alto)

Considerando entonces que el CH₄ recuperado representa el 50% del biogás recuperado, la potencia disponible para generación eléctrica es el rango medio (Figura 6.4) es:

$$Potencia\ disponible\ [kW] = 0.33 * \frac{5kWh}{m^3} * \frac{420 \frac{m^3}{h}}{0.5} = 1386\ kW$$

El motogenerador requerido con un factor del 20 % de sobre diseño es de 1663.20 kW. En función de la Potencia disponible y un factor de disponibilidad de 85 % por mantenimiento según la ecuación 6.2, se estimó la energía eléctrica por generar (Blanco *et al.*, 2017).

$$\text{Electricidad [kW/año]} = \text{Potencia disponible [kW]} * 0.85 * 8760 \frac{h}{año} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

$$\begin{aligned} \text{Electricidad [kW/año]} &= 1386 \text{ kW} * 0.85 * 8760 \frac{h}{año} = 10,320,156 \text{ kW/año} \\ &= 10,320.16 \text{ MWh/año} \end{aligned}$$

Además del motogenerador dimensionado requiere del siguiente equipo, que puede adquirirse en unidades de paquete:

- Bombas Centrífugas o Sopladores (equipo de extracción de biogás dual). Algunas de las marcas en el mercado son EG&ROTRON y Continental industries.
- Sistema de Purificación o Tratamiento (Remoción de Condensados, H₂S, y Siloxanos).
- Compresión y Dosificación.
- Sistema de Destrucción (quemado en antorcha)
- Subestación Eléctrica.

6.2 Evaluación ambiental

Se realizó la evaluación ambiental antes que la económica, debido a que la captura de CH₄ y su oxidación, tanto para generar energía eléctrica como por simple quemado, reduce las emisiones de GEI y por ende, el impacto al ambiente.

En la tabla en la tabla 6.2 se muestran las emisiones tanto de CH₄ como de CO₂ equivalentes (EQ) que se emiten sin proyecto, es decir, cuando no se está quemando el biogás, ni aprovechando para generación de electricidad; lo cual sumaría un total de 4,107,692 t de CO₂.

Mientras que la tabla 6.3 presenta las emisiones bajo el escenario elegido de RP, cuando se recupera el 70 % del CH₄ con el sistema de succión y se considera el 33% del rendimiento térmico en la generación eléctrica para un flujo medio (Figura 6.4); esto último significa que se tiene un 33% de destrucción del CH₄ captado con el sistema de succión.

La columna titulada “CAMBIO NETO” de la tabla 6.3, se refiere a la reducción neta de emisiones de CO₂ que se logra con el proyecto propuesto de aprovechamiento energético, el cual se obtiene de restar a las emisiones equivalentes de CO₂ sin proyecto, las emisiones equivalentes de CO₂ destruidas.

El “CAMBIO NETO” suma para el proyecto propuesto 3,242,416 t de CO₂ que se evitaría emitir a la atmósfera, que representa el 78.94% de las emisiones, lo cual es realmente sustancial.

Tabla 6.2 Emisiones de GEI a la atmósfera sin proyecto

AÑOS	EMISIONES DE CH ₄ (m ³ /año) C5+C4	EMISIONES DE CH ₄ (t/año)	CH ₄ EN TÉRMINOS DE CO ₂ EQ. EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (t/año)	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (m ³ /año)	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (t/año)	CO ₂ TOTAL EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (t/año)
1	1,177,853	848.05	19,505	1,177,853	1,885	21,390
2	7,462,972	5,373	123,587	7,462,972	11,941	135,528
3	11,494,449	8,276	190,348	11,494,449	18,391	208,739
4	11,595,870	8,349	192,028	11,595,870	18,553	210,581
5	10,870,052	7,826	180,008	10,870,052	17,392	197,400
6	10,725,941	7,723	177,622	10,725,941	17,162	194,783
7	10,783,824	7,764	178,580	10,783,824	17,254	195,834
8	10,549,069	7,595	174,693	10,549,069	16,879	191,571
9	9,762,715	7,029	161,671	9,762,715	15,620	177,291
10	9,674,255	6,965	160,206	9,674,255	15,479	175,684
11	9,630,750	6,934	159,485	9,630,750	15,409	174,894
12	9,150,863	6,589	151,538	9,150,863	14,641	166,180
13	8,397,651	6,046	139,065	8,397,651	13,436	152,501
14	8,581,975	6,179	142,118	8,581,975	13,731	155,849
15	8,517,969	6,133	141,058	8,517,969	13,629	154,686
16	8,300,875	5,977	137,462	8,300,875	13,281	150,744
17	7,583,991	5,460	125,591	7,583,991	12,134	137,725
18	7,103,756	5,115	117,638	7,103,756	11,366	129,004
19	6,730,453	4,846	111,456	6,730,453	10,769	122,225
20	6,339,398	4,564	104,980	6,339,398	10,143	115,123
21	6,060,056	4,363	100,355	6,060,056	9,696	110,051
22	5,861,105	4,220	97,060	5,861,105	9,378	106,438
23	5,675,083	4,086	93,979	5,675,083	9,080	103,060
24	5,492,395	3,955	90,954	5,492,395	8,788	99,742
25	5,255,863	3,784	87,037	5,255,863	8,409	95,446
26	5,031,017	3,622	83,314	5,031,017	8,050	91,363
27	4,811,781	3,464	79,683	4,811,781	7,699	87,382
28	4,627,045	3,331	76,624	4,627,045	7,403	84,027
29	4,404,389	3,171	72,937	4,404,389	7,047	79,984
30	4,541,063	3,270	75,200	4,541,063	7,266	82,466
Total						4,107,692

Tabla 6.3 Emisiones de GEI a la atmósfera con proyecto

AÑOS	EMISIONES DE CH ₄ (t/año) CONSIDERANDO 70% RECOLECCION DE C5+C4	CH ₄ DESTRUIDO (33% APROX EFECIENCIA) (t/año)	CH ₄ EMITIDO A LA ATMÓSFERA (t/año)= CH ₄ GENERADO – CH ₄ DESTRUIDO	CH ₄ EN TÉRMINOS DE CO ₂ EQ. EMITIDO A LA ATMÓSFERA (t/año)	CH ₄ DESTRUIDO EN TÉRMINOS DE CO ₂ EQ. (POR FLAMA O POR GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD) (t/año)	CAMBIO NETO (REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂)
1	594	196	652	15,000	4,506	16,884
2	3,761	1,241	4,132	95,038	28,549	106,979
3	5,793	1,912	6,364	146,378	43,970	164,769
4	5,844	1,929	6,420	147,669	44,358	166,223
5	5,479	1,808	6,019	138,426	41,582	155,818
6	5,406	1,784	5,939	136,591	41,031	153,753
7	5,435	1,794	5,971	137,328	41,252	154,582
8	5,317	1,755	5,841	134,339	40,354	151,217
9	4,920	1,624	5,405	124,325	37,346	139,945
10	4,876	1,609	5,356	123,198	37,008	138,677
11	4,854	1,602	5,332	122,644	36,841	138,053
12	4,612	1,522	5,067	116,533	35,005	131,174
13	4,232	1,397	4,650	106,941	32,124	120,377
14	4,325	1,427	4,752	109,288	32,829	123,020
15	4,293	1,417	4,716	108,473	32,584	122,102
16	4,184	1,381	4,596	105,709	31,754	118,990
17	3,822	1,261	4,199	96,579	29,011	108,714
18	3,580	1,181	3,933	90,464	27,174	101,830
19	3,392	1,119	3,727	85,710	25,746	96,479
20	3,195	1,054	3,510	80,730	24,250	90,873
21	3,054	1,008	3,355	77,173	23,182	86,869
22	2,954	975	3,245	74,639	22,421	84,017
23	2,860	944	3,142	72,270	21,709	81,350
24	2,768	913	3,041	69,944	21,010	78,731
25	2,649	874	2,910	66,932	20,106	75,341
26	2,536	837	2,786	64,068	19,245	72,118
27	2,425	800	2,664	61,276	18,407	68,975
28	2,332	770	2,562	58,924	17,700	66,327
29	2,220	733	2,439	56,088	16,848	63,135
30	2,289	755	2,514	57,829	17,371	65,095
Total						3,242,416

6.3 Evaluación económica

La evaluación económica del proyecto de aprovechamiento del biogás de las C4 y C5, operándolas como Bio-RESA con RP de lixiviados comprende la estimación de los costos de inversión, los costos de operación y el análisis de sensibilidad; los cuales se describen a continuación:

- a) Costos de inversión. Estos costos incluyen los costos de los principales equipos y componentes del sistema de aprovechamiento de biogás y para su estimación se consideraron experiencias semejantes, usando la herramienta conocida como Estimación Análoga (Top Down); para ello se empleó la “Regla de los seis décimos” que muestra la ecuación 6.3 (Jiménez, 2003; Ulrich *et al.*, 1992).

$$I_2 = I_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{0.6} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

Donde:

I_2 : Inversión del equipo a la capacidad deseada escalada (Q_2)

Q_2 : Capacidad deseada escalada

I_1 : Inversión del equipo a la capacidad reportada (Q_1)

Q_1 : Capacidad reportada

Para el costo de inversión Q_2 escalado, que es de un año diferente al deseado, se utilizó la ecuación 6.4 con los Índices Anuales reportados en la revista “Chemical Engineering” para los años 2013 y 2017, que son 567.3 y 575.1 respectivamente (CE, 2017; CE, 2018).

$$I_{2a} = I_{1a} \left(\frac{CE_{\text{año } 2a}}{CE_{\text{año } 1a}} \right)^{0.6} \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Donde:

I_{2a} : Inversión del equipo al año actual o requerido

$CE_{\text{año } 2a}$: Índice anual al año presente o año requerido, escalado en el tiempo

I_{1a} : Inversión del equipo reportada en el año 1a

$CE_{\text{año } 1a}$: Índice anual al año en que se reporta la I_{1a}

En la tabla 6.4 se listan los costos en USD de los equipos y componentes necesarios para el Sistema de aprovechamiento del CH₄ en un RESA a las capacidades reportadas en los trabajos de SCS, (2013) e INCREMI, (2013), así como el escalamiento a las capacidades requeridas para el proyecto de aprovechamiento para C4 y C5 como Bio-RESA para 2013 en USD (Ec. 6.3) y al año 2017 (Ec. 6.4). La inversión total al 2017 en Pesos Mexicanos (MN), considerando un valor de \$20.00 MN por USD se estimó de \$46,949,673.70 (Cuarenta y seis millones novecientos cuarenta y nueve mil seiscientos setenta y tres pesos 70/00 MN).

Tabla 6.4 Costo de Inversión para el sistema de aprovechamiento de biogás de las C4 y C5 como Bio-RESA con RP

CONCEPTO	UNIDADES	CANCÚN (2013)		SALTILLO (2013)		C4 Y C5	2013	2017	
		CANTIDAD	C/U (DLS)	CANTIDAD	C/U (DLS)	CANTIDAD	C/U (DLS)	C/U (DLS)	PESOS MN
Movilización y gestión	Paquete	1	66,000.00	1	77,000.00	1	77,000.00	78,058.70	1,561,173.98
Nuevos pozos	Número	11	12,000.00	35	9,000.00	9	3,984.26	4,039.04	80,780.73
Modificaciones a pozos	Número	30	6,000.00	6	6,218.00	9	7,930.59	8,039.63	160,792.60
Equipo de extracción dual	Paquete	8	5,000.00	4	5,000.00	2	3,298.77	3,344.13	66,882.51
Tubería principal	m	1800	70.00	1770	302.00	350	114.20	115.77	2,315.39
Tubería lateral (ramales)	m	1000	35.00	1197	292.00	170	90.53	91.78	1,835.51
Trampas de condensado	Número	3	11,000.00	3	10,660.00	3	11,000.00	11,151.24	223,024.85
Pozos de inspección	Número	1	15,000.00			1	15,000.00	15,206.24	304,124.80
Válvulas de los cabezales principales	Número	3	2,000.00			3	2,000.00	2,027.50	40,549.97
Estación de la antorcha	Paquete	1	200,000.00	1	213,200.00	1	213,200.00	216,131.36	4,322,627.18
Construcción y preparación de la estación de antorcha	Paquete	1	80,000.00	1	310,512.00	1	310,512.00	314,781.33	6,295,626.69
Motor a biogás	kW	633	1,200.00	2120	1,500.00	1663.2	1,296.75	1,314.58	26,291.60
Subestación de la planta	Paquete	1	150,000.00	1	150,000.00	1	150,000.00	152,062.40	3,041,248.02
Interconexión eléctrica	Paquete	1	150,000.00	1	533,000.00	1	533,000.00	540,328.40	10,806,567.95
Puesta en marcha	Paquete	1	15,000.00			1	15,000.00	15,206.24	304,124.80
Prueba de origen o en la fuente	Paquete	2	25,000.00	1	30,000.00	1	30,000.00	30,412.48	608,249.60
Equipo de medición de biogás	Número	1	35,000.00	1	40,000.00	1	40,000.00	40,549.97	810,999.47
Costos de ingeniería, contingencias	Paquete	1	152,000.00	1	902,218.00	1	902,218.00	914,622.90	18,292,458.02
Total			925,305.00		2,288,902.00		2,315,788.10	2,347,483.68	46,949,673.70

Gracias a la información proporcionada por personal la empresa MASERA se estimaron los Costos de Inversión para la excavación de los vasos de las C4 y C5, así como para los pozos de venteo y el sistema de drenado de lixiviados al año 2017, incluyendo las fosas de lixiviados, los cuales se detallan en la tabla 6.5. Estos costos suman \$ \$ 37,708,982.99 (Treinta y siete millones setecientos ocho mil novecientos ochenta y dos pesos 99/00 MN).

Si bien los costos de inversión por la excavación de los vasos, el levantamiento de los pozos de venteo y la construcción del drenado de lixiviados ya fue realizado por la empresa, para los fines de este trabajo se consideraron al 2017.

En cuanto a los Costos de Inversión del equipo e infraestructura para el aprovechamiento del biogás se estimaron para el 2017, debido a que se tiene conocimiento que en las C4 y C5 se dispusieron RSU están en operación desde 2015 y 2017; las celdas estarían en su tercer y primer año de operación, lo que prácticamente coincide con la generación propuesta para el dimensionamiento del motogenerador (Figura 6.4). Conforme a lo anterior, el costos de la inversión de las celdas y el sistema de aprovechamiento suman \$ 84,658,656.69 (Ochenta y cuatro millones, seiscientos cincuenta y ocho mil, seiscientos cincuenta y seis pesos 69/100 MN).

- b) Costos de operación. Los costos de operación de C4 y C5 engloban la mano de obra (MO) del personal especializado y de operadores, la operación y el mantenimiento de la maquinaria y equipo para esparcir, compactar y cubrir con suelo los RSU, de febrero 2013 a enero 2015 y de febrero 2015 al 09 de marzo 2017 respectivamente; los gastos de la RP de los lixiviados desde enero 2015 en C4 y de marzo 2017 para C5; así como los gastos de supervisión y administrativos desde sus inicios hasta el fin de los 30 años que abarca el proyecto.

Para la estimación de los costos de operación se consideró la ecuación 6.5 (Jiménez, 2003), donde a es un factor que considera gastos anuales como regalías, mantenimiento, etc., los cuales no se conocen a este nivel de diseño preliminar, de manera que se estimaron como el 10 % del costo de Inversión total. Los otros términos como bMP son costos de materias primas, cE costos de energía, dMO costos de mano de obra; que para este estudio están incluidos en los costos por disposición promedio de RSU y los costos de recirculación de lixiviados. En este caso los costos por subproductos (pSP) no se consideraron.

Los costos por disposición de RSU son de \$60.00-80.00 (en promedio Setenta pesos 00/MN) por tonelada de RSU dispuesta y \$138,152.00 (Ciento treinta y ocho mil ciento cincuenta y dos pesos 00/00 MN) para la recirculación de lixiviados en pozos en el año 2017 (Tabla 6.6), considerando 56 semanas por año y una inflación anual del 2% (INCREMI, 2013).

Tabla 6.5 Costo de Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados

CONCEPTO	RANGO DE COSTOS	COSTOS RESA X (\$)	UNIDADES	C4		C5	
				CANTIDAD	COSTO	CANTIDAD	COSTO
Topografía	\$ 4.00-5.00 /m ²	4.50	m ²	6300.00	\$ 28,350.00	15124.02	\$ 68,058.09
Estudios Geotécnicos (Completo)	\$ 220 000.00-\$230 000.00	225,000.00	Paquete	1	\$ 225,000.00	1	\$ 225,000.00
Excavación mecánica de vaso	\$32.00-\$38.00/m ³	35.00	m ³	204194.45	\$ 7,146,805.75	314954.82	\$ 11,023,418.70
Acarreo (material extraído)	\$20.00-\$24.00/m ³	22.00	m ³	265452.79	\$ 5,839,961.38	409441.26	\$ 9,007,707.72
Geomembrana (HDP, 5mm)	\$ 85.00-92.00 /m ²	90.00	m ²	12094.91	\$ 1,088,541.90	18904.78	\$ 1,701,430.20
Capa de Cobertura Inicial (suelo)	\$70.00-\$73.00/m ³	73.00	m ³	2661.74	\$ 194,307.02	5571	\$ 406,683.00
Desplante de Pozos	\$9000.00-9200.00 /pozo	9,000.00	Piezas	2	\$ 18,000.00	7	\$ 63,000.00
Piedra Braza pozos	\$700.00-750.00 /m ³	750.00	m ³	70	\$ 52,500.00	218	\$ 163,500.00
Tubo PVC y Malla	\$450.00-500.00 /m lineal	450.00	m	70	\$ 31,500.00	218	\$ 98,100.00
Quemadores	\$6500.00-7000.00 /quemador	6,500.00	Piezas	2	\$ 13,000.00	7	\$ 45,500.00
Tubería HPDE 6"	\$300.00-350.00 tramo de 6 m	58.33	m	90	\$ 5,250.00	100	\$ 5,833.33
Piedra Braza dren lixiviados	\$700.00-750.00 /m ³	750.00	m ³	90	\$ 67,500.00	100	\$ 75,000.00
Excavación mecánica de fosa	\$32.00-\$38.00 /m ³	35.00	m ³	367.50	\$ 12,862.50	1158.30	\$ 40,540.50
Geomembrana de vaso (HDP, 5mm)	\$ 85.00-92.00 /m ²	90.00	m ²	189.00	\$17,010.00	495.81	\$ 44,622.90
Subtotales					\$ 14,740,588.55		\$ 22,968,394.44
TOTAL							\$ 37,708,982.99

Tabla 6.6 Gastos para recirculación de lixiviados en 2017

CONCEPTO	RANGO DE COSTOS	COSTO RESA X	UNIDADES	C4		C5	
				CANTIDAD	COSTO (\$/año)	CANTIDAD	COSTO (\$/año)
Salario de chofer por día	\$450.00-500.00 /día	\$500.00 /día	Salario	56	28,000.00	168	84,000.00
Mantenimiento de pipa para RESA	\$350.00-400.00 / semana	\$400.00 /semana	Mantenimiento	28	11,200.00	28	11,200.00
Consumo de gasolina de pipa 15 L /día	\$16.50 - 17.00 / L	16.75	\$/L	56	938.00	168	2,814.00
SUBTOTAL					40,138.00		98,014.00
					TOTAL		138,152.00

$$C = a I + bMP + cE + dMO - pSP \quad (\text{Ec. 6.5})$$

$$C = \left(\frac{0.1}{\text{año}}\right) * 84,658,656.69 + \$ 9,116,677.48 / \text{año} + \$ 138,152.00 / \text{año}$$

$$C = \$ 17,720,695.15 / \text{año}$$

c) Análisis de sensibilidad. Este análisis es importante para conocer la viabilidad económica del proyecto; por lo que primero se calculó la Utilidad Bruta o Beneficio Bruto (R) con la ecuación 6.6; donde S son las Ventas que se obtienen de los ingresos por la recepción de RSU en el RESA, por la Energía Eléctrica producida a rango medio con el biogás en el motogenerador a la que se le consideró un precio de \$3.00/kWh y por los Bonos de Carbono, para los que se consideró un precio de 10 USD/t de CO₂. En la tabla 6.7 se desglosan los ingresos anuales de estos rubros y en la tabla 6.8 se concentran los valores totales y promedio.

$$R = S - C \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Posteriormente se calculó la Ganancia Neta (P) mediante la ecuación 6.7 y para el análisis de sensibilidad se estimaron el Retorno de Inversión (RI), el Valor Presente Neto (VPN) con un 8% de tasa de interés (FAO, 2011), el Rango Costo Beneficio (RCB), (SAGARPA & FIRCO, 2007), Beneficio Extra (V) para un Beneficio Mínimo (i_{min}) de 0.3 y el Tiempo de recuperación de capital (TR) (Jiménez, 2003; SAGARPA & FIRCO, 2007); con las ecuaciones 6.8 a 6.12 respectivamente.

Tabla 6.7 Ingresos por energía eléctrica y por bonos de carbono

AÑO	EMISIO- NES DE CH4 C5+C4 (m3/h)	70% recolección C5+C4 (m3/h)	POTEN- CIA DISPONIB LE PARA CIDAD (kW)	ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA (kWh/año)	INGRESOS POR ENERGÍA ELÉCTRICA (\$3.00/kWh) (\$/año)	70% DE RECOLEC -CIÓN (t/año)	CH4 DESTRUIDO AL 33% EFECIENCIA (t/año)	CH4 DES- TRUIDO EN TÉRMINOS DE CO2 EQ. (t/año)	INGRESOS BONOS DE CARBONO (10 USD) (\$/año)
1	134.46	94.12	310.60	2,312,713.57	6,938,140.70	593.64	195.90	4,505.71	901,142.04
2	851.94	596.36	1,967.98	14,653,545.21	43,960,635.63	3,761.34	1,241.24	28,548.55	5,709,710.79
3	1,312.15	918.51	3,031.07	22,569,349.91	67,708,049.72	5,793.20	1,911.76	43,970.40	8,794,080.81
4	1,323.73	926.61	3,057.81	22,768,490.16	68,305,470.49	5,844.32	1,928.63	44,358.38	8,871,675.23
5	1,240.87	868.61	2,866.42	21,343,347.13	64,030,041.40	5,478.51	1,807.91	41,581.86	8,316,372.44
6	1,224.42	857.10	2,828.42	21,060,385.03	63,181,155.09	5,405.87	1,783.94	41,030.59	8,206,117.08
7	1,231.03	861.72	2,843.68	21,174,037.86	63,522,113.58	5,435.05	1,793.57	41,252.01	8,250,401.58
8	1,204.23	842.96	2,781.78	20,713,096.99	62,139,290.96	5,316.73	1,754.52	40,353.99	8,070,797.32
9	1,114.47	780.13	2,574.41	19,169,090.95	57,507,272.86	4,920.41	1,623.73	37,345.90	7,469,179.91
10	1,104.37	773.06	2,551.09	18,995,399.09	56,986,197.28	4,875.82	1,609.02	37,007.51	7,401,501.39
11	1,099.40	769.58	2,539.62	18,909,977.12	56,729,931.36	4,853.90	1,601.79	36,841.08	7,368,216.97
12	1,044.62	731.23	2,413.07	17,967,719.23	53,903,157.69	4,612.03	1,521.97	35,005.34	7,001,068.95
13	958.64	671.05	2,214.45	16,488,786.80	49,466,360.39	4,232.42	1,396.70	32,124.04	6,424,807.28
14	979.68	685.77	2,263.06	16,850,707.76	50,552,123.27	4,325.32	1,427.35	32,829.14	6,565,828.72
15	972.37	680.66	2,246.18	16,725,031.58	50,175,094.75	4,293.06	1,416.71	32,584.30	6,516,859.36
16	947.59	663.31	2,188.93	16,298,767.82	48,896,303.45	4,183.64	1,380.60	31,753.83	6,350,766.94
17	865.75	606.03	1,999.89	14,891,166.64	44,673,499.92	3,822.33	1,261.37	29,011.50	5,802,299.28
18	810.93	567.65	1,873.25	13,948,224.76	41,844,674.28	3,580.29	1,181.50	27,174.42	5,434,884.75
19	768.32	537.82	1,774.81	13,215,244.95	39,645,734.84	3,392.15	1,119.41	25,746.41	5,149,281.33
20	723.68	506.57	1,671.69	12,447,408.56	37,342,225.69	3,195.06	1,054.37	24,250.48	4,850,096.14
21	691.79	484.25	1,598.03	11,898,920.52	35,696,761.55	3,054.27	1,007.91	23,181.90	4,636,379.38
22	669.08	468.35	1,545.57	11,508,278.80	34,524,836.39	2,954.00	974.82	22,420.83	4,484,166.98
23	647.84	453.49	1,496.51	11,143,025.43	33,429,076.28	2,860.24	943.88	21,709.24	4,341,847.08
24	626.99	438.89	1,448.34	10,784,316.71	32,352,950.13	2,768.17	913.50	21,010.39	4,202,077.29
25	599.98	419.99	1,385.96	10,319,886.63	30,959,659.89	2,648.95	874.16	20,105.57	4,021,113.47
26	574.32	402.02	1,326.67	9,878,401.32	29,635,203.97	2,535.63	836.76	19,245.45	3,849,090.02
27	549.29	384.50	1,268.86	9,447,931.74	28,343,795.23	2,425.14	800.30	18,406.79	3,681,358.82
28	528.20	369.74	1,220.15	9,085,203.55	27,255,610.64	2,332.03	769.57	17,700.11	3,540,022.84
29	502.78	351.95	1,161.43	8,648,018.51	25,944,055.53	2,219.81	732.54	16,848.37	3,369,674.98
30	518.39	362.87	1,197.47	8,916,377.27	26,749,131.80	2,288.70	755.27	17,371.20	3,474,240.18
Total					1,332,398,554.75	Total			173,055,059.35
Promedio (\$/año)					44,413,285.16	Promedio (\$/año)			5,768,501.98

$$R = \$19,535,737.46/\text{año} + \$44,413,285.16/\text{año} + \$133,724.56/\text{año} - \$5,768,501.98/\text{año}$$

$$R = \$51,996,829.44/\text{año}$$

$$P = R - eI - t(R - dI) \quad (\text{Ec. 6.7})$$

Donde:

P , es la utilidad neta

e , es el factor de depreciación para fines contables (0.1)

d , es el factor de depreciación para fines de impuestos (0.1)

t , es la tasa de impuesto (0.33)

$$P = \$51,996,829.44/\text{año} - 0.1 * \$84,658,656.69 - 0.33 (\$51,996,829.44/\text{año} - 0.1 * \$84,658,656.69)$$

$$P = \$29,165,745.73/\text{año}$$

Tabla 6.8 Costos e ingresos resumidos para Bio-RESA

CONCEPTO	COSTOS	INGRESOS
Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados 2017	\$ 37,708,982.99	
Inversión del Sistema de aprovechamiento de biogás 2017	\$ 46,949,673.70	
Costos total de Inversión	\$ 84,658,656.69	
Costos por disposición de RSU 2013-2017	\$ 39,201,713.16	
Costo promedio por disposición de RSU 2017	\$ 9,116,677.48/año	
Costos por recirculación de lixiviados 2017-2046	\$ 138,152.00/año	
Ingresos por recepción de RSU 2013-2017		\$ 84,003,671.07
Ingresos promedio por recepción de RSU 2017		\$ 19,535,737.46/año
Ingresos Bonos de Carbono (10 USD) 2017-2046		\$ 173,055,059.35
Ingresos Bonos de Carbono promedio (10 USD) 2017-2046		\$ 5,768,501.98/año
Ingresos por Energía Eléctrica (\$3.00/kWh) 2017-2046		\$ 1,332,398,554.75
Ingresos promedio por Energía Eléctrica (\$3.00/kWh) 2017-2046		\$ 44,413,285.16/año

$$RI = \frac{\text{Utilidad Neta o Ganancia}}{\text{Inversión}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 6.8})$$

$$RI = \frac{\$ 29,165,745.73 \text{ /año}}{\$ 84,658,656.69} * 100 = 34.45 \%$$

$$VPN = \frac{\text{Flujo de Efectivo}}{(1+\text{Tasas de Interés})^{\text{Periodo}}} \quad (\text{Ec. 6.9})$$

$$VPN = \frac{\$29,165,745.73/\text{año}}{(1+0.08)^{10}} = \$ 13,175,082.04 \text{ /año}$$

$$RCB = \frac{\text{Ingresos}}{\text{Egresos}} \quad (\text{Ec. 6.10})$$

$$RCB = \frac{(\$ 19,535,737.46 + \$ 44,413,285.16 + \$ 5,768,501.98)}{(\$ 84,658,656.69*0.1 + \$ 9,116,677.48 + \$138,152.00)} = 3.93$$

$$V = P - i_{\min} * I \quad (\text{Ec. 6.11})$$

$$V = \$29,165,745.73 \text{ /año} - 0.3 * \$ 84,658,656.69 = \$3,768,148.72 \text{ /año}$$

$$TR = \frac{I}{P + eI} \quad (\text{Ec. 6.12})$$

$$TR = \frac{\$ 84,658,656.69}{\$ 29,165,745.73 \text{ /año} + 0.1 * \$ 84,658,656.69} = 1.39 \text{ años}$$

De acuerdo a los valores obtenidos, el proyecto es atractivo pues presenta un retorno de la inversión mayor al valor mínimo establecido del 30 % ($RI > i_{\min}$ min) y el Rango Costo Beneficio (RCB) además de ser mayor de uno es amplio (3.93).

En cuanto al VNP , es positivo, lo que significa que se obtiene la tasa requerida del 8% y un extra a 10 años. Como $RI > i_{\min}$ min, entonces $V > 0$, corroborando lo obtenido con el VNP ; mientras que el valor de TR (1.39 años) indica que en menos de 2 años los inversionistas recuperarán todo el capital invertido, si el total de las utilidades se les entregan, lo cual es atractivo pero no recomendable, pues el proyecto requerirá que parte de ellas se reinviertan (Jiménez, .2003).

CONCLUSIONES

Las caracterizaciones de RSU de las celdas del RESA de Zinacantepec realizadas en diferentes épocas muestran la variabilidad de sus subproductos, lo cual es crucial para determinar la fracción biológicamente degradable y, estimar con mayor certidumbre la generación de biogás.

Los RSU dispuestos contienen más del 30% de subproductos potencialmente valorizables, por lo que la recolección diferenciada o la separación previa a la disposición, reduciría el impacto ambiental y aumentaría la vida útil del RESA de Zinacantepec.

Las evaluaciones de las condiciones de operación de las C4 y C5 evidenciaron diferentes áreas de oportunidad en cada una de ellas, las cuales deben ser atendidas en el corto plazo para reducir las emisiones de GEI a la atmósfera.

De los escenarios tumba seca, RS y RP para cada uno de dos modelos de las C4 y C5, se obtuvieron las mayores generaciones de CH₄ mediante las simulaciones con Modulo 4.0 a 30 años, cuando se recirculó lixiviados en pozos.

La operación como Bio-RESA con recirculación en pozos de las C4 y C5 es viable técnica, económica y ambientalmente, por lo que de su implementación cumpliría con el objetivo de ser sustentable.

REFERENCIAS

- Aguilar V. Q. (2012). Estimación de las constantes k y Lo de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en Baja California, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, ISSN: 01884999. Sup. 1, Vol. 28, 2012. pp. 43-49.
- Ali Rajaeifar M. Tabatabaei M. Ghanavati H. Khoshnevisan B. Raffie S. (2015). Comparative life cycle assesment of different municipal solid waste management scenarios in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 5. pp. 886-898.
- APHA. (2005). Standard Methods for Water and Wastewater Examination. 21st ed. American Public Health Association-American Water Works Association, Water Environment Federation Publication, Washington, DC. USA.
- Bagchi, A. (2004). Desing of landfills and integrated waste management. 3rd ed. pp:119-125.
- Barry, D., Gregory, B., Harries, C. (2004). Minimising methane emissions from MSW landfill. Atkins Environment, UK.
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., Levy, A. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos. Un análisis teórico-práctico. Nota técnica N° IDB-TN-1260. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8202/Generacion-de-electricidad-a-partir-de-biogas-capturado-de-residuos-solidos-urbanos-Un-analisis-teorico-practico.PDF?sequence=1>
- Conde C. (2010). México y el cambio climático global. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-968-817-868-3
- CE. (2017). Chemical Engineering's Plant Cost Index (CE). www.chemengonline.com December 2017
- CE. (2018). Chemical Engineering's Plant Cost Index (CE). www.chemengonline.com January 2018
- Crowe, M. K. Nolan, C. Collins, G. Carty, B. Donlon and M. Kristoffersen. (2002) Biodegradable Municipal Waste Management. In: Europe: Strategies and instruments, European Topic Centre on Waste. Topic Report, European Environment Agency. pp. 16-20.
- Díaz-Archundia L.V. (2016). Diagnóstico de la generación de biogás en tres sitios de disposición de residuos sólidos urbanos en el Estado de México. Tesis de doctorado para la obtención de grado. División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Toluca.

Díaz-Villavicencio G.J. Regina Didonet S. Marín Gutiérrez I.M. (2013). Sustentabilidad en Gestión de los Residuos Urbanos (GERU): caso de municipios españoles. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*. Vol. 10, pp. 124-152.

DOF. (2006). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Norma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 2006. (Consultada: 30 de noviembre 2016). http://www.inb.unam.mx/stecnica/nom052_semarnat.pdf

DOF. (2016). Declaratoria de Vigencia de la Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016, "ANÁLISIS DE AGUA-MEDICIÓN DE METALES POR ABSORCIÓN ATÓMICA EN AGUAS NATURALES, POTABLES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS- MÉTODO DE PRUEBA (cancela a la NMX-AA-051-SCFI-2001)". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 07 de diciembre de 2016. (Consultada el 30 de diciembre 2016). http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5464459&fecha=07/12/2016

Eriksson, M., Strid, I., Hansson, P. (2015). Waste management carbon footprint off food waste management options in the waste hierarchy – a Swedish case study. *Journal Clean. Prod.* 93, pp. 115–125.

FAO. (2011). Manual de Biogás. Editado por: Proyecto CHI/00/G32 “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Global Environment Facility (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF). ISBN 978-95-306892-0. <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

García Maya Edgar C. (2011). Evaluación de la atenuación natural del lixiviado incorporado en la zona no saturada subyacente al vertedero de RSM del Municipio de Mexicaltzingo, Tesis Maestría en C. en Ing. Ambiental, Instituto Tecnológico de Toluca.

González-Razo, C.A. (2012). Caracterización del biogás en el Relleno de tierra de Morelia, Michoacán. Tesis de Doctorado. Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, B.C.N., México. pp. 62-99

GRID. (2013). Agendal collaborated with UNEP. (Consultado: 12 de Noviembre de 2013). Vital Waste Graphics. www.grida

HACH. (1997). Sistema DQO de Hach para análisis de agua residual. Lit. No. 4257, H74 ©Hach Company. Estados Unidos de America. (Consultada el 10 de noviembre de 2015). [http://www.hach.com/fmmimghach?/CODE%3AL42575109%](http://www.hach.com/fmmimghach?/CODE%3AL42575109%3A)

Hernández-Berriel, Ma. C., Aguilar-Virgen Q., Taboada- González P., Lima- Morra R., Eljaiek-Urzola M., Márquez-Benavides L., Buenrostro-Delgado O. (2016). Generación y composición de los residuos sólidos domésticos en América Latina y el Caribe. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 32 (Especial Residuos Sólidos) DOI: 10.20937/RICA.2016.32.05.02 ISSN: 0188-4999. pp.11-21.

Hernández-Berriel, Ma. C., Mañón-Salas, C., Buenrostro-Delgado O., Sánchez-Yáñez, J.M., Márquez-Benavides, L. (2014). Landfill leachate recirculation. Part I: Solid waste degradation and biogas production. *Environmental Engineering and Management Journal*. Print ISSN: 1582-9596. ISSN: 1843-3707. 13(10), pp 2687-2695.

Hoornweg D. & Bhada-Tata P. (2012). What a waste. A global review of solid waste management. Urban development series knowledge papers. The World Bank. Urban Development Series, March 2012, No. 15. (Consultado: 10 de Enero 2017). http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf 29/04/2014

INCREMI. (2013). Estudio de Factibilidad para el Aprovechamiento del Metano en el Relleno Sanitario Municipal de Saltillo, Coahuila. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) e Ingeniería para el Control de Residuos Municipales e Industriales S.A. de C.V. (ICREMI). Saltillo, Coahuila, México. https://www.globalmethane.org/data/221_INFORME_FINAL_SALTILLO.pdf

INE. (2010). Potencial de mitigación de gases de efecto invernadero en México al 2020 en el contexto de la cooperación internacional. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

INECC. (2012). Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. DF. (Consultado: 14 de Febrero de 2013). <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaPublicacion.php>

Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), División de Salud y Ambiente de la Organización Panamericana de la Salud (OPS); Oficina Sanitaria Panamericana y Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud (OPS). OPS/CEPIS/PUB/02.93
<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/e/fulltext/rellenos/rellenos.pdf>

Jiménez, A. (2003). Diseño de procesos en Ingeniería Química. Reverté, ed 1ª, ISBN: 968-6708-51-0, pp:10-30.

Ulrich G. (1992). Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. McGrawHill-Interamericana de México S.A. de C.V. ed.1ª.

López, A.; Cuartas, M. y Lobo A. (2013). Moduelo 4.0 Manual de usuario. Universidad de Cantabria, España.

Machado S. L., Carvalho M. F., Gourc J.P., Vilar O. M., Nascimento J.C.F. (2008). Methane generation in tropical landfill: Simplified methods and field results. *Waste Management*. Doi:10.1016/j. wasman.02.017. 2008.

Márquez-Benavides Liliana. (2004). Study Of The Effect Of Soil Inclusion On The Anaerobic Degradation Of Municipal Solid Waste, Tesis de Doctorado, University of Strathclyde in Glasgow.

Mohammad Ali R. Hossein G. Behrouz B.D. Reinout H. Mortazaga A. Meisan T. (2017). Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.79. págs 414-439.

NOAA & NCDC. (2013). (National Oceanic and Atmospheric Administration & National climat Data Center). Contiguous U.S. Temperature January 1895-2013. (Consultado: 15 de Febrero de 2013). <http://www.ncdc.noaa.gov/tempandprecip/timeseries/index.php?parameter=tmp&month=4 & year=2012&filter=ytd&state=110&div=0>.

OCDE. (2012). Las emisiones de gases de efecto invernadero. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OCDE Estadísticas del medio ambiente (base de datos) DOI: 10.1787/data-00594.

OMM. (2013). Convenciones y convenios sobre el medio ambiente. . Organización Meteorológica Mundial. (Consultado: 10 de Febrero de 2013). http://www.wmo.int/pages/about/Environmentalconventions_es.html

OPS-AIDIIS-BID (2010). Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010. Organización Panamericana de la Salud-Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental-Banco Interamericano de Desarrollo, pp. 23.

PNUD. (2011). Informe sobre Desarrollo Humano 2011, Sostenibilidad y Equidad, un mejor Futuro para todos. Programa de las naciones unidas para el desarrollo. (Consultado: 13 de Febrero de 2013). <http://www.undp.org.mx/spip.php?article2129>. PNUD México.

Sánchez, G.J. (2006). Bio-rellenos metanogénicos: opción sustentable para la disposición final de los residuos sólidos. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. ISSN 0718-378X, 1(1).

SCS Engineers. (2009). Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0. SCS Engineers Phoenix, AZ 85008. Contrato de EPA No. EP – W -06-023, 2009. Actividad 30. Landfill Methane Outreach Program. Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA).

SEMARNAT. (2009). Manual de Especificaciones Técnica para la construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME), Dirección de Manejo Sustentable de Residuos Sólidos, Contrato DGRMIS-DCA-DGFAUT-No. 018/2009. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SEMARNAT. (2015a). Mecanismo para un Desarrollo Limpio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, DF. (Consultado: 10 de Febrero de 2015). www.semarnat.gob.mx.

SEMARNAT. (2015b). Inventario nacional de emisiones. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (Consultado: 14 de Febrero de 2015). <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Paginas/InventarioNacionaldeEmisiones.aspx>. México. D.F.

SEMARNAT. (2016). Normas Mexicanas en materia de agua. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (Consultado: 13 de Noviembre 2016). <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-agua>

SEMARNAT. (2017). Normas Mexicanas en materia de contaminación de suelo. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (Consultado: 20 de Enero 2017). <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-suelos>

SEMARNAT-INECC. (2013). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010, Primera Edición. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Impreso en México, ISBN: 978-607-8246-63-2, http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=697

SENER. (2014). Balance Nacional de Energía 2014. Secretaría de Energía (SENER). Subsecretaría de Planeación y Transición Energética y Dirección General de Planeación e Información Energéticas. México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44353/Balance_Nacional_de_Energ_a_2014.pdf

Schroeder, P. (1994). The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3., Whashington, DC (USA).

Sopkas K., Graff C., Morcet M., Aran C. (2003). Implications of spatial variability of landfill emission rates on geospatial analyses. *Waste Management*, Vol. 23: pp. 599-607.

Spokas K., Bogner J., Chanton J. P., Morcet M., Aran C., Graff C., Moreau-Le G. Y. Hebe I. (2005). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gass collection systems? Elsevier.

Staines F. (2007). Cambio climático: interpretando el pasado para entender el presente. *Ciencia Ergo Sum*, (14-3), pp. 345-351.

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. (1994). Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill-INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A. México, D.F. Vol. I.

Torres-Corral Saúl. (2012). Análisis Ambiental, Geológico y Geográfico del Vertedero de Almoloya del Rio y del Riesgo Potencial de Afectación de Suelo y Agua en la Zona Subyacente, Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Toluca.

UNFPA. (2014). United Nations Population Fund. Population Size and Climate Change. (Consultado: 10 de Febrero de 2014). <http://www.unfpa.org/pds/climate/dynamics.html>.

USDA. (2014). United States Department of Agriculture, Guide to Texture, (Consultado: 27 de Octubre de 2014). http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/kthru6/?cid=nrcs142p2_05431.

Valencia-Vázquez, (2008). Enhanced Stabilisation of Municipal Solid Waste in Biorreactor Landfill. PhD Thesis. Wgeningen University and UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Wang-Yao K., Towprayoon S., Chiemchaisri Ch., Gheewala Sh.H., Nopharatana A. (2006). Seasonal Variation of Landfill Methane Emissions from Seven Solid Waste Disposal Sites in Central Thailand, 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE2006). Bangkok, Thailand.

Wrefor, K.A., J.W. Atwater., L.M. Lavkulich. (2000). The effects of moisture inputs on landfill gas production and composition and leachate characteristics at the Vancouver Landfill Site at Burns Bog. *Waste Management & Research*, Vol. 18: pp. 386-392.

Zach, A., E. Binner and M. Latif. (2000) Improvement of municipal solid waste quality for landfilling by means of mechanical-biological pretreatment. *Waste Management & Research*. 18: pp. 25-32.

ANEXO A



Santander, 20 de Marzo de 2017

A QUIEN CORRESPONDA:

En el marco de nuestra colaboración en la REDISA (Red de Ingeniería de Saneamiento Ambiental) y a la participación en el Proyecto de Investigación "UBICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS INTERMUNICIPALES FUTUROS EN EL ESTADO DE MÉXICO Y ESTADOS ALEDAÑOS", aprobado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) con clave 263315, tengo a bien INVITAR a la DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL, Responsable Técnica del proyecto en mención y Profesora Investigadora del Instituto Tecnológico de Toluca, para realizar una estancia de investigación en nuestro Grupo de Ingeniería Ambiental, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, España, en el período del 1 de Mayo al 5 de Julio del 2017.

Dentro de los objetivos de su estancia se tiene la capacitación de la profesora en el programa de simulación MODUELO 4; determinar, mediante simulación con MODUELO 4, la generación de biogás y lixiviados bajo el escenario actual de operación de dos celdas tipo RESA, y a diferentes tasas de recirculación en dos celdas tipo Biorrelleno (Bio-RESA); así como evaluar técnica y ambientalmente los diferentes escenarios de operación sin y con recirculación de lixiviados.

Integrada en el Grupo de Ingeniería Ambiental la profesora determinará la tasa de recirculación de lixiviados apropiada para dos celdas del Relleno Sanitario de Zinacantepec, mediante simulación con MODUELO 4. Los resultados generados durante la estancia complementarán sus trabajos de la Estadía de año sabático "APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO MEDIANTE DISEÑO DE CELDAS CON BIODEGRADACIÓN ACELERADA".

Firmo el presente documento en Santander a los veinte días del mes de marzo de 2017, para que surta efectos oportunos a nivel de facilitar su desplazamiento a España.

Atentamente

Amaya Lobo García de Cortázar
Profesora de Tecnologías del Medio Ambiente
Miembro del Grupo de Ingeniería Ambiental
Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente
Universidad de Cantabria

ANEXO B


SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Toluca

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Metepec, Méx. Abril 04, 2017

DIRECCIÓN
D100-0663/ 2017.

MTRO. MANUEL QUINTERO QUINTERO
DIRECTOR GENERAL DEL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
P R E S E N T E.

At'n. Dra. Jesús Ofelia Angulo Guerrero
Secretaría de Extensión y Vinculación

Por este conducto, solicito de la manera más atenta su autorización para que la Dra. María del Consuelo Hernández Berriel, pueda realizar una Estancia de Investigación en el Grupo de Ingeniería Ambiental, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, España, en el periodo del 01 de Mayo al 05 de Julio del 2017.

La realización de la Estancia de Investigación de la Dra. Hernández Berriel es de suma importancia, debido a que permitirá sea capacitada en el programa de simulación MODUELO 4 e integrada en el Grupo de Ingeniería Ambiental, determine la tasa de recirculación de lixiviados apropiada para dos celdas del Relleno Sanitario de Zinacantepec, mediante simulación con MODUELO 4. Es importante mencionar que los resultados generados durante la estancia complementarán sus trabajos de la Estadia de año sabático "Aprovechamiento energético mediante diseño de celdas con biodegradación acelerada".

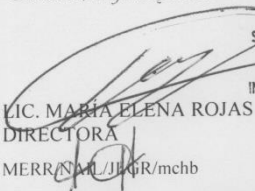
Durante la Estancia de Investigación la Dra. Hernández Berriel también participará en el "VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos", como expositora del trabajo "Biodegradación acelerada anaeróbica y aeróbica de residuos sólidos urbanos en biorreactores escala laboratorio", a celebrarse 13 y 14 de junio 2017; así como en la reunión de trabajos de la REDISA (Red de Ingeniería de Saneamiento Ambiental) que se realizará del 12 al 16 de junio 2017. Ambos evento se llevarán a cabo en la Universidad de Cantabria en Santander, España.

La participación de la Dra. Hernández Berriel le permitirá representar al Tecnológico Nacional de México y poner en alto el nombre de México, al compartir el trabajo de Investigación que desarrolla en la Línea de Investigación "Tratamiento de Contaminantes y Gestión Ambiental" clave TOL-LGAC-02-15. Así mismo, la Estancia de Investigación le permitirá enriquecer su formación con conocimientos de actualidad, así como interactuar con estudiantes y profesores de otras latitudes con los que podrá establecer sinergias para trabajos futuros. Cabe mencionar que su participación es congruente con los objetivos de los programas de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental y del Doctorado en Ciencias Ambientales, contribuye al cumplimiento de los indicadores requeridos a nuestros programas de Posgrado por el PNPC del CONACYT y se alinea especialmente con los indicadores 1.3, 4.2 y 5.3 de las metas del PIID 2013-2018 del Instituto Tecnológico de Toluca.

Los gastos de transportación (aérea y terrestre) serán cubiertos por el COMECYT, los de la inscripción al evento por la REDISA y los de alimentación y hospedaje por la Dra. Hernández Berriel.

En espera de una respuesta favorable.

ATENTAMENTE
"Educación, integridad y ciencia"


LIC. MARIA ELENA ROJAS RAUDA
DIRECTORA
MERR/NAI/JRGR/mchb


SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIRECCIÓN


Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx


Certificado
ISO 9001:2008

ANEXO C



CONSTANCIA

El Comité Científico del VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos otorga la presente constancia a **María del Consuelo Hernández Berriel** por su presentación ORAL del trabajo:

"Biodegradación acelerada anaeróbica y aeróbica de residuos sólidos urbanos en biorreactores escala laboratorio"

de los autores: *María del Consuelo Hernández Berriel, Gisela Inés Hernández Contreras, Isaías De la Rosa Gómez, María del Consuelo Mañón Salas y Gloria Irene Carmona Chit* en el

***VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos:
hacia una Economía Circular***

que tuvo lugar en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, en Santander (España) los días 13 y 14 de junio de 2017.

Santander, 14 de junio de 2017



Dra. Amaya Lobo García de Cortázar
Coordinadora del Comité Organizador



ANEXO D



CONSTANCIA

El Comité Científico del VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos otorga la presente constancia a **María del Consuelo Hernández Berriel** por su presentación ORAL del trabajo:

"Propuesta de una planta de segregación en un relleno sanitario, caso de estudio"

de los autores: *Isis Neftaly Martínez Morales, María del Consuelo Hernández Berriel, Sara Ojeda Benítez, María del Consuelo Mañón Salas y Nicolás Flores Álamo* en el

***VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos:
hacia una Economía Circular***

que tuvo lugar en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, en Santander (España) los días 13 y 14 de junio de 2017.

Santander, 14 de junio de 2017



Dra. Amaya Lobo García de Cortázar
Coordinadora del Comité Organizador



CANTABRIA
CAMPUS
INTERNACIONAL



ANEXO E

CI/A-066

COMPARACIÓN DE TÉCNICAS MULTICRITERIO PARA SELECCIONAR SITIOS DE DISPOSICIÓN DEL NORTE DEL ESTADO DE MÉXICO

[COMPARISON OF MULTICRITERION TECHNIQUES TO SELECT SITES OF DISPOSITION OF THE NORTH OF THE STATE OF MEXICO]

María del Consuelo Muñoz-Solís, María del Consuelo Hernández-Barral¹, Elvira Olaj Romero, María del Carmen Carroño de León e Inés de la Rosa Gómez

Instituto Tecnológico de Tehuacán, Av. Tecnológico s/n. Col. Ex Ranchito La Virgen, CP. 52146, Tehuacán, Edo. de México, México

¹ Autor para correspondencia (mhuander@itctehuacan.mx)

Palabras Clave: *Ponderación lineal, Proceso analítico jerárquico*

Una de las mayores problemáticas medioambientales actuales es la generación de los residuos sólidos urbanos (RSU), provocada por los hábitos de consumo y el incremento de la población. Situación que se agrava al considerar donde depositarlos. Otro aspecto importante para tomar decisiones es la composición de los RSU, ya que de ésta depende su recolección, selección del tratamiento, adquisición de equipos y sistemas, así como el desarrollo de un plan de gestión integral que coadyuve a la conservación del ambiente¹. Debido a que los estudios de composición de los RSU requieren de recursos económicos y humanos, es necesario elegir los sitios de disposición final (SDF) representativos de un área a atender, y es ahí donde las herramientas de toma de decisión como el método Analítico Jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process) y el método de Ponderación Lineal (Scoring) pueden ser empleadas. El AHP asegura que tanto los aspectos cualitativos como cuantitativos de un problema son incorporados en el proceso de evaluación, mejorando con ello el proceso de decisión; mientras que el método de Scoring permite abordar situaciones de incertidumbre, con pocos niveles de información². Confiense a lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar la facilidad de utilizar las herramientas mencionadas para la selección de SDF representativos de la zona norte de la península del Estado de México, a los cuales posteriormente se les realizaron estudios de caracterización de RSU para mejorar su manejo integral. MATERIALES Y MÉTODOS: La muestra de SDF se integró por sitios de 36 municipios del Estado de México. Los criterios a evaluar se agruparon en las categorías SDF y residuos; y como subcriterios se eligieron relleno sanitario (RESA), sitios controlados (SC), tiraderos a cielo abierto (TCA), unidades económicas (UE), población (POB) y generación de RSU (GRSU). Previo a la aplicación del método Score se refinaron los SDF cuyos valores extremos podían presentar problemas, debido a las distintas unidades de medida empleadas. Los sitios que se desarrollaron consideraron: la asignación de una ponderación a cada criterio de 1 a 5 con base a la opinión de expertos en el área (Tabla 1), la medición del nivel de satisfacción de cada alternativa por criterio y el establecimiento del *rating* de satisfacción para cada alternativa empleando una escala de nueve puntos. Se calculó el Score para cada una de los SDF, ordenando de mayor a menor.

Tabla 1. Relación de alternativas por criterio

Criterio	Signo del criterio	Ponderación alternativa (a)
Recurso Sanitario	RESA	3

ANEXO F



Encuentro de Expertos en Residuos Sólidos

Avances en el Estudio de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

Festival por el Ambiente Xoxoctic Tlalil 2017: Seminario RAEE



Compiladores
Dr. Fabián Robles Martínez
Dra. Ana Belem Piña Guzmán

Avances en el Estudio de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos / Hernández Berriel et al.

DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS, RIESGOS A LA SALUD Y AL AMBIENTE

¹Maria del Consuelo Hernández Berriel*, ²Otoniel Buenrostro Delgado, ³Maria del Consuelo Mañón Salas, ⁴Isaías de la Rosa Gómez, ⁵Gloria Irene Carmona Chit

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Lázaro Cárdenas, Av. Tecnológico S/N, Colonia Llano Grande, C.P. 52148 Metepec, Edo. de México, 01 722 208 7200, extensión (3630).

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. San Juanito Iticuaru S/N, Arboledas Valladolid, C.P. 58330 Morelia, Michoacán.

Correo electrónico: *hberriel_1999@yahoo.com

RESUMEN

En México los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) se han incrementado debido al abaratamiento de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE), a la "Obsolescencia Programada", a que los productores no aplican la "Responsabilidad Extendida" y, a que no se implementa la Gestión integral de residuos sólidos urbanos (GIRSU) en todas las municipalidades. El objetivo del presente trabajo fue conocer la proporción de RAEE que existen en los sitios de disposición final (SDF) de municipios del Estado de México que colindan con municipios de Morelos, Guerrero, y Michoacán, así como exponer el riesgo que representan para el ambiente y la salud pública. Para ello se muestreó y caracterizó RSU en los SDF y se realizó la tipificación de los efectos ambientales y a la salud de los RAEE, mediante observación en campo e investigación documental. Se constató que debido a la poca vigilancia, al incipiente interés de autoridades municipales y a la falta de conocimiento de los compuestos tóxicos que contienen los RAEE, éstos son desmantelados por los segregadores primarios en los SDF sin equipo de protección, dejando los restos a la intemperie, con lo que los lixiviados generados contienen metales pesados y Retardadores de Flama Bromados (BFR), o bien son quemados generando compuestos peligrosos como dioxinas y furanos. Para reducir los efectos a la salud y al ambiente por los RAEE se requiere informar a la ciudadanía sobre sus riesgos potenciales, implementar la GIRSU y promover que los productores de los AEE apliquen la "Garantía extendida".

Palabras Clave: RAEE, Riesgos potenciales, Tiraderos, Toxicidad, Salud.

1. INTRODUCCIÓN

En México, los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) o WEEE (siglas de Waste Electrical Electronic Equipment) son considerados residuos manejo especial de acuerdo con el artículo 19, fracción VIII de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) [1]. La producción de RAEE en México en el 2006 fue alrededor de 300,000 toneladas, de las cuales el 70% fue almacenado por sus dueños, el 15% se dispusieron inadecuadamente en Tiraderos a Cielo Abierto (TCA), menos del 2% se recicló y el resto se exportó ilegalmente. Se estima que en el año 2012 se produjeron 400,000 ton, con un incremento anual de la generación del 3 al 5% [2]. Asimismo, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Ecología (INE), el volumen de los RAEE se ha incrementado desde 2010, debido a que su producción per cápita fue de tres a cinco kg en ese año, en tanto que para el año 2015 la cifra creció a nueve kg/hab. Esto último refiere que en 2015 se produjeron sobre 900,000 ton de RAEE [3].

Q Iván Yassmany Her

Fwd: [RICA] EVALUACIÓN

Back

Forward

Archive

Move

Delete

Spam

Print

Fullscreen

Mensaje reenviado -----

Asunto: [RICA] EVALUATION OF EFFECTS OF CONFINEMENT CONDITIONS AND CONTENT OF LIGNOCELLULOSIC COMPOUNDS ON URBAN SOLID WASTE BIODEGRADATION RATES.

Fecha: Wed, 4 Oct 2017 15:07:41 -0700

De: Sara Ojeda Benítez <sara.ojeda.benitez@uabc.edu.mx>

Para: Otoniel Buenrostro <otoniel.buenrostro@hotmail.com>; María Del Consuelo Hernández Berriel <mirsolvel@yahoo.com.mx>; Iván Yassmany Hernández Paniagua <ivan.hernandez@atmosfera.unam.mx>; Kevin C. Clementshaw <K.Clementshaw@thul.ac.uk>; José Alfredo Nila Cuevas <nilajoselafredo@gmail.com>; CC: Claudio Amesca <claudio.amesca@atmosfera.unam.mx>; M. en C. Irene Romero Nájera <irene.romero@atmosfera.unam.mx>; Claudia Estela Saldaña Durán <csaldadanaduran@gmail.com>

Le informamos que ha concluido la revisión de su trabajo " EVALUATION OF EFFECTS OF CONFINEMENT CONDITIONS AND CONTENT OF LIGNOCELLULOSIC COMPOUNDS ON URBAN SOLID WASTE BIODEGRADATION RATES". Los revisores consideran que puede ser publicado. Sin embargo, para poder programar su publicación, necesitamos que revisen detalladamente que TODAS las normas para autores se cumplan y que los metadatos de su manuscrito sean correctos y estén completos. Adicionalmente, requerimos que las instituciones sean correctas y vengan los domicilios postales completos.

Si en su listado de referencias tienen vínculos a internet, favor de revisar que estén actualizados y que lleven directamente a la cita mencionada. Asimismo, es necesario que TODOS los artículos científicos citados en su trabajo y que cuenten con DOI, lo traigan incluido al final de la referencia. Verifiquen el cumplimiento de Directrices para autores.

En cuanto hayan revisado los metadatos y tengan la versión corregida y revisada, súbala a este mismo registro de su trabajo 52609 y envíenos un correo de notificación.

Asegúrese de ingresar al siguiente vínculo:
<http://www.revistascca.unam.mx/rica>

Sin más por el momento reciba saludos cordiales.

Atentamente,

Dra. Sara Ojeda Benítez
Editora Asociada

Revista Internacional de Contaminación Ambiental
<http://www.revistascca.unam.mx/rica>
URL: <http://www.revistascca.unam.mx/rica>

ANEXO G