



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**Modelación de la producción de lixiviados que se
generan en los componentes putrescibles de los
residuos sólidos urbanos de Guayaquil-Ecuador**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Federico Guillermo VON BUCHWALD DE JANON

ASESOR

Dr. Oscar Rafael TINOCO GÓMEZ

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Von, F. (2019). *Modelación de la producción de lixiviados que se generan en los componentes putrescibles de los residuos sólidos urbanos de Guayaquil-Ecuador*. Tesis para optar grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

CODIGO ORCID DEL AUTOR: NO TIENE

CODIGO ORCID DEL ASESOR:

0000-0002-7927-931x

DNI: 0905534707

GRUPO DE INVESTIGACIÓN: NO TIENE

INSTITUCIÓN QUE FINANCIA PARCIAL O TOTALMENTE LA INVESTIGACIÓN:

Recursos Propios

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DONDE SE DESARROLLÓ LA INVESTIGACIÓN. DEBE INCLUIR LOCALIDADES Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS:

X 615404.8604

Y 9769821.0724

Z 73.90

AÑO O RANGO DE AÑOS QUE LA INVESTIGACIÓN ABARCÓ:

Enero 2016- marzo 2018



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

UNIDAD DE POSGRADO



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos-Lima, a los dieciséis días del mes de setiembre del 2019, siendo las 12:00 horas, se reúnen los suscritos miembros del JURADO EXAMINADOR DE TESIS, nombrado mediante Dictamen N.º 638/UPG-FIGMMG/2019 del 28 de agosto del 2019, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TITULO

«MODELACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS QUE SE GENERAN EN LOS COMPONENTES PUTRESCIBLES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE GUAYAQUIL - ECUADOR»

Que, presenta el Mg. **FEDERICO GUILLERMO VON BUCHWALD DE JANON**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**.

El secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N.º 05682-FIGMMG-2015 del 11 de agosto del 2015, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento de los Estudios de Maestría y Doctorado».

Luego de la Sustentación de la Tesis, los miembros del Jurado Examinador procedieron a aplicar la escala descrita en el Art. 61 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

BUENO (16)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES** al Mg. **FEDERICO GUILLERMO VON BUCHWALD DE JANON**.

Siendo las 13:00 horas, se dio por concluido al acto académico


DR. RAYMUNDO ERAZO ERAZO
Presidente


DR. RUBÉN GILBERTO RODRÍGUEZ FLORES
Secretario


DR. ARÍSTIDES SOTOMAYOR CABRERA
Miembro


DR. OSCAR RAFAEL TINOCO GÓMEZ
Asesor

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi esposa Sabrina y a mis hijos Fanny Esther, Heidi, Federico y Giuliana.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Jehova Dios por todo, un especial agradecimiento a mi esposa Sabrina y a mis hijos Fanny Esther, Heidi, Federico y Giuliana por haberme permitido dedicar parte de su tiempo a esta investigación, agradezco también al equipo del consorcio ILM encabezados por el Ing. Pablo Martinez y la QFC. Katerine Piña, a sus directores que me apoyaron en este desafío y por el apoyo de los profesores de la UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, PhD Oscar Tinoco, PhD Carlos Cabrera, Jesús Ángel Chavez Machado, entre otros, que me guiaron a desarrollar esta tesis.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación problemática	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos	2
1.3. Justificación teórica.....	3
1.4. Justificación práctica	3
1.5. Objetivos de la investigación	4
1.5.1. Objetivo general	4
1.5.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Marco filosófico de la investigación	6
2.2 Antecedentes de investigación	6
2.2.1 Ensayos relacionados con producción de lixiviados.....	16
2.2.2 Composición de los residuos.....	18
2.2.3 Masa específica de los residuos	31
2.2.4 Condiciones ambientales de Guayaquil	32
2.2.5 Producción de lixiviados en el Relleno Sanitario Las Iguanas de Guayaquil	32
2.2.6 Influencia de las aguas lluvia en el relleno sanitario de Guayaquil	37
2.2.7 Métodos de cálculo de producción de lixiviados (considerando influencias de lluvias) aplicados a los sectores del relleno sanitario de Guayaquil	41
2.2.8 Clasificación de los RSU en función de las condiciones económicas	43
2.2.9 Tamaño de la muestra	44
2.3 Marco legal.....	49
2.3.1 Disposiciones legales en Ecuador	49
2.3.2 Disposiciones legales en Perú	53
2.4 Bases teóricas	55
2.5 Hipótesis general	57
2.5.1 Hipótesis específicas	57
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	58
3.1. Metodología de la investigación.....	58
3.2. Tipo y diseño de Investigación.....	58
3.3. Técnica de recolección de datos y análisis en laboratorio.....	63

3.4.	Producción de los lixiviados en tanques (lisímetros)	64
3.5.	Producción de lixiviados en celdas “tipo” (experimentales) de RS.	66
3.6.	Análisis e interpretación de la información.....	68
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		70
4.1	Análisis, interpretación y discusión de los resultados.....	70
4.1.1	Análisis de la caracterización de los residuos sólidos urbanos del RS de Guayaquil	70
4.1.2	Clasificación de la materia orgánica putrescible (MOP)	75
4.1.3	Clasificación de materiales absorbentes.....	84
4.1.4	Producción de lixiviados	89
4.2	Pruebas de hipótesis	148
4.3	Presentación de los resultados	149
CONCLUSIONES		155
RECOMENDACIONES		159
Referencias bibliográficas.....		160
ANEXOS		165

Lista de Cuadros

Cuadro 1 Comparación del modelo de Pantini con otros modelos hidrológicos de producción de lixiviados	15
Cuadro 2 Componentes de residuos sólidos (EEUU)	19
Cuadro 3 Composición química de los residuos sólidos	20
Cuadro 4. Materiales de los residuos sólidos municipales por tipo, composición y fuentes	21
Cuadro 5. Cantidad composición de los residuos sólidos municipales (porcentaje de masa húmeda)	22
Cuadro 6. Composición física de residuos sólidos	23
Cuadro 7 Composición de los residuos sólidos municipales	25
Cuadro 8. Caracterización de los residuos sólidos en cantones de la provincia del Guayas con excepción de Guayaquil	26
Cuadro 9. Caracterización resumen de los residuos sólidos en cantones de la provincia del Guayas con excepción de Guayaquil	30
Cuadro 10. Caracterización de los residuos sólidos en el Relleno Sanitario Las Iguanas de Guayaquil	31
Cuadro 11. Masa específica de los residuos domésticos en diferentes etapas	31
Cuadro 12 Clima en Guayaquil	32
Cuadro 13. Producción de residuos sólidos domiciliarios por sector económico en Guayaquil	44
Cuadro 14. Cálculo del tamaño de la muestra	46
Cuadro 15. Producción de residuos per cápita por estrato socioeconómico de la ciudad de Guayaquil (2016)	48
Cuadro 16. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce	52
Cuadro 17. Diseño de investigación de los componentes de la caracterización	59
Cuadro 18. Diseño de investigación de los componentes de la materia orgánica	59
Cuadro 19. Diseño de investigación de los componentes orgánicos en laboratorio	60
Cuadro 20. Caracterización de residuos sólidos municipales Relleno Sanitario Las Iguanas	71
Cuadro 21 Test de normalidad de componentes de caracterización de RSU años 2012, 2016 y 2017	75
Cuadro 22. Nombres científicos de los componentes de la materia orgánica de los RSU de Guayaquil	77
Cuadro 23. Composición del material putrescible en función de estratos socioeconómicos referido a los resultados de caracterización del RS Las Iguanas 2016	80
Cuadro 24 Test de normalidad usando prueba Kolmogorov-Smirnov para componentes orgánicos putrescibles año 2016	82
Cuadro 25 Intervalo de confianza (al 90%, 95% y 99%) para la media de los componentes de la materia orgánica putrescible, año 2016	83
Cuadro 26 Intervalo de confianza (al 90%, 95% y 99%) para la media de los componentes de la materia no putrescible, año 2016.	84
Cuadro 27. Composición del material absorbente en función de sectores por niveles económicos	85
Cuadro 28. Absorción en materiales derivados de papel y cartón	87

Cuadro 29. Cantidad de agua que puede retener el material absorbente en 1 tonelada de basura	88
Cuadro 30 Nivel de adsorción de los componentes medido en kg/t de RSU	89
Cuadro 31. Pérdida de masa en los RSU con el método de desecación	91
Cuadro 32 Comparativo de métodos de laboratorio para lixiviación	93
Cuadro 33 Generación de lixiviados en RSU con métodos de desecación y MGFRS en condiciones anaerobia y aerobia.	102
Cuadro 34 Generación de lixiviados en RSU con método MGFRS	108
Cuadro 35 Comparación de resultados de descomposición de los RSU de Guayaquil medidos en laboratorio.	110
Cuadro 36 Combinación de curvas aerobias y anaerobias MGFRS normalizadas simulando las condiciones del relleno sanitario de Guayaquil	112
Cuadro 37 Elementos que no cumplen con los rangos permitidos para descarga a un cuerpo de agua	114
Cuadro 38. Combinaciones entre materia orgánica putrescible y materia orgánica absorbente en lisímetros	116
Cuadro 39 Curva de modelación de generación acumulada en 10 lisímetros	130
Cuadro 40 Resumen de las curvas de tendencia de la generación de lixiviados en 33%, 50%, 60% y 100% de MOP	132
Cuadro 41 Resumen de proyección de modelación de la producción de lixiviados en celdas “tipo” de RS	140
Cuadro 42 Generación diaria de lixiviados en relleno sanitario.	143

Lista de figuras

Figura 1 Variación de producción de lixiviados con diferentes concentraciones de materia orgánica versus tiempo. Yan et al. (2016). 14	14
Figura 2. Composición de los residuos sólidos municipales de Estados Unidos 2013. Universidad de Michigan (2013) 24	24
<i>Figura 3 Plano de ubicación del Relleno Sanitario Las Iguanas en la ciudad de Guayaquil.</i> von Buchwald (2011)..... 33	33
Figura 4 Evolución de la composición de lixiviados y gases en el RS Las Iguanas. von Buchwald (2011)..... 34	34
<i>Figura 5. Producción de lixiviados durante la operación Sector A del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil.</i> von Buchwald (2009) 34	34
Figura 6. Producción de lixiviados etapa de cierre Sector A del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)..... 35	35
<i>Figura 7. Producción de lixiviados durante la operación Sector C del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil;</i> von Buchwald (2009) 36	36
Figura 8. Producción de lixiviados, etapa de cierre Sector C del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)..... 37	37
Figura 9. Infiltración de aguas lluvia sector A del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009) 38	38
Figura 10. Infiltración de aguas lluvias sector C del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009) 39	39
Figura 11. Infiltración de aguas lluvias sector D del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009) 40	40
Figura 12. Comparación métodos de cálculo de lixiviados sectores A del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009) 41	41
Figura 13. Comparación métodos de cálculo de lixiviados sector C del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009) 42	42
Figura 14. Comparación métodos de cálculo de lixiviados sector D del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009) 43	43
Figura 15. Esquema general de la investigación. 62	62
Figura 16 Corte transversal de elementos para la aplicación del método MGFRS 64	64
Figura 17. Corte transversal de los lisímetros 65	65
Figura 18. Corte transversal de la celda “tipo” 68	68
Figura 19 Caracterización por estratos socioeconómicos. 73	73
Figura 20 Prueba de dos colas. Suárez (2012) 74	74
Figura 21 Composición de la materia orgánica por estrato socioeconómico. Elaboración propia..... 78	78
Figura 22 Composición del material putrescible en función de estratos socioeconómicos. Elaboración propia 79	79
Figura 23 Promedio ponderado de composición de la materia orgánica de los RSU de Guayaquil (todos los sectores socioeconómicos). Elaboración propia 80	80
Figura 24. Composición del papel en los estratos socioeconómicos 85	85

Figura 25. Composición del material absorbente en función de sectores por niveles económicos	86
Figura 26. Promedio ponderado de composición del papel de los RSU de Guayaquil (todos los sectores socioeconómicos)	86
Figura 27 Curva de producción de lixiviados en función del contenido de MOP desarrollado con el método Tchobanoglous	90
Figura 28 Producción de lixiviados en residuos de plátano verde con método MGFRS anaerobio (método propio)	94
Figura 29 Producción de lixiviados en residuos de cítricos (naranja) con método MGFRS anaerobio (método propio)	95
Figura 30 Producción de lixiviados en residuos de comida preparada con método MGFRS anaerobio (método propio)	95
Figura 31 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio anaerobio	97
Figura 32 Producción diaria acumulada de lixiviados de RSU con método MGFRS (método propio) medio anaerobio	98
Figura 33 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio aerobio	99
Figura 34 Producción diaria acumulada de lixiviados de RSU con método MGFRS (método propio) medio aerobio	100
Figura 35 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio anaerobio, solo componentes normalizados	103
Figura 36 Producción diaria acumulada de lixiviados de RSU con método MGFRS (método propio) medio anaerobio, componentes normalizados	104
Figura 37 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio aerobio, con componentes normalizados	105
Figura 38 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio aerobio, solo componentes normalizados	106
Figura 39 Comparación de la producción diaria acumulada de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medios aerobio y anaerobio, con el método de desecación, solo componentes normalizados	107
Figura 40 Masa remanente, producción de lixiviados, vapor y gas en procesos MGFRS aerobio y anaerobio normalizados	110
Figura 41 MGFRS aerobio y anaerobio al 58,42% MOP	111
Figura 42 Producción diaria de lixiviados de la combinación del proceso MGFRS aerobio – anaerobio normalizado	112
Figura 43 Producción diaria acumulada de lixiviados de la combinación del proceso MGFRS aerobio – anaerobio normalizada	113
Figura 44 Lisímetros de escala piloto de RS, ubicados en el RS Las Iguanas	115
Figura 45 Generación diaria de lixiviados en lisímetros en los primeros 30 días	116
Figura 46 Generación diaria de lixiviados en lisímetros en 235 días ..	117
Figura 47 Lisímetro L3 (Polinomio pp) Kg/t vs días	117
Figura 48 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L3 con 50% MOP. Elaboración propia	124
Figura 49 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L5 con 60% MOP. Elaboración propia	125

Figura 50 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L6 con 60% MOP. Elaboración propia	125
Figura 51 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L12 con 60% MOP. Elaboración propia	126
Figura 52 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro TQ6 con 60% MOP. Elaboración propia	126
Figura 53 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L7 con 100% MOP. Elaboración propia	127
Figura 54 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro TQ1 con 100% MOP. Elaboración propia	127
Figura 55 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados	128
Figura 56 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L2 con 100% MOP. Elaboración propia	129
Figura 57 Modelación de generación acumulada promedio de lixiviados en lisímetros con 33%, 50%, 60% y 100% de materia orgánica putrescible.	131
Figura 58 Modelación de generación acumulada promedio de lixiviados en lisímetros con 33%, 50%, 60% y 100% de materia orgánica putrescible.	133
Figura 59 Producción de lixiviados en celdas “tipo” de RS en 460 días con influencia de aguas lluvias, tonelada de lixiviado/tonelada de RSU. Elaboración propia	134
Figura 60 Producción de lixiviados en celdas “tipo” de RS en los primeros 40 días sin influencia de aguas lluvias, tonelada de lixiviado/tonelada de RSU. Elaboración propia	137
Figura 61 Modelación de la producción diaria acumulada en la celda norte sin influencia de aguas lluvias. Elaboración propia	138
Figura 62 Modelación de la producción diaria acumulada en la celda sur sin influencia de aguas lluvias. Elaboración propia	139
Figura 63 Modelación de la producción diaria acumulada en la celda impermeable sin influencia de aguas lluvias. Elaboración propia	139
Figura 64 Volumen acumulado diario proyectado de lixiviados en celdas “tipo” de RS, días sin influencia de aguas lluvias. Elaboración propia	141
Figura 65 Comparación de modelación de volúmenes acumulados de producción de lixiviados en muestras normalizadas de laboratorio, celdas “tipo” de RS y lisímetros de “escala piloto” de RS con 60% MOP, y registros del relleno sanitario Las Iguanas. Elaboración propia	142
Figura 66 Combinación de procesos aerobio y anaerobio para determinar la curva de producción de lixiviados con 58.42% MOP. Elaboración propia	147

RESUMEN

Los lixiviados emanados por los desechos orgánicos son potenciales riesgos para los acuíferos por ende su cadena trófica.

El 70 % de los residuos sólidos urbanos (RSU) en el mundo, se disponen en rellenos sanitarios (RS) y botaderos a cielo abierto y en ese mismo porcentaje la composición de materia orgánica putrescible (MOP) es muy alta sobre todo en los países pobres; en los países industrializados (que constituyen parte del 30% restante) que tienen composiciones muy bajas en MOP, no se producen lixiviados sin adición de lluvias o lodos; sin embargo en la operación del RS de Guayaquil, se ha evidenciado la presencia de lixiviados en celdas iniciadas en época no lluviosa. Por lo que se planteó desarrollar la modelación de la producción de lixiviados generada por los componentes orgánicos putrescibles (MOP), sin adición de agua en los RSU en condiciones semejantes a las de Guayaquil.

El proceso de esta investigación es cuantitativo, el método utilizado es experimental, para lo cual se utilizaron técnicas de revisión documental, y experimentación en laboratorio, lisímetros y celdas tipo.

Se identificaron 18 componentes de la MOP, siendo los restos de plátano verde los de mayor proporción; en laboratorio, usando un método desarrollado por el autor en condiciones aerobias y anaerobias, se hicieron ensayos y con los resultados se generaron modelaciones de las tendencias de producción de lixiviados. También se generaron modelaciones de producción de lixiviados usando varios lisímetros con diferentes composiciones de MOP, encontrándose que con composiciones bajas de MOP, no se producen lixiviados.

Para contrastar los resultados de producción se desarrollaron investigaciones en celdas experimentales de 400 toneladas con RSU que ingresan al relleno sanitario de Guayaquil (con 60% MOP), sin adición de aguas lluvias.

Finalmente, se compararon los resultados de producción de lixiviados obtenidos en laboratorio (aerobios y anaerobios) con 4 lisímetros y 3 celdas experimentales.

ABSTRACT

Leachates emanating from organic waste are potential risks to aquifers, hence their food chain.

The 70% of urban solid waste (MSW) in the world, are disposed in sanitary landfills (RS) and open-air dumps and in that same percentage the composition of putrescible organic matter (POM) is very high especially in poor countries in industrialized countries (which constitute part of the remaining 30%) that have very low compositions in POM, leachate is not produced without the addition of rainfall or sludge; However, in the operation of the RS of Guayaquil, the presence of leachates in cells started during the non-rainy season has been evidenced. Therefore, it was proposed to develop the modeling of leachate production generated by putrescible organic components (POM), without adding water in the MSW under conditions similar to those of Guayaquil.

The process of this research is quantitative, the method used is experimental, for which documentary review techniques were used, and laboratory experiments, lysimeters and type cells were used.

18 components of the POM were identified, the remains of green banana being the highest proportion; In the laboratory, using a method developed by the author in aerobic and anaerobic conditions, lab test were conducted and the results generated modeling of leachate production trends. Leaching production modeling was also generated using several lysimeters with different POM compositions, finding that with low POM compositions, leaching is not produced.

To contrast the production results, research was carried out on experimental 400-ton cells with MSW entering the sanitary landfill of Guayaquil (with 60% POM), without the addition of rainwater.

Finally, the results of leachate production obtained in the laboratory (aerobic and anaerobic) were compared with 4 lysimeters and 3 experimental cells.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

En el mundo se generan anualmente 2,12 billones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU); en el 70% de los países, la materia orgánica putrescible (MOP) constituye más del 45% de su composición, el 30% restante corresponde mayoritariamente a países industriales, donde la composición de materia orgánica putrescible es menor al 45%; coincidentemente, el 70% de las ciudades usan botaderos a cielo abierto y rellenos sanitarios (RS) como sistema de disposición final de RSU (Waste Atlas Report, 2013) y dado que el costo de operación de los rellenos sanitarios es muy bajo, algunos países industrializados, como es el caso de EE. UU, mantienen el 22% de su disposición final de RSU en rellenos sanitarios (Environmental Protection Agency EPA, 2006).

La materia orgánica está constituida por una fracción no biodegradable y otra fracción biodegradable, putrescible, la que se descompone en líquidos, vapor y gases, siguiendo los conceptos demostrados por Lavoisier, “en una reacción química, la cantidad de materia es la misma al comienzo y al final de la reacción” (Chávez, 2001), sin embargo algunos investigadores de países industriales, afirman que los RSU no producen lixiviados a menos que estén influenciados por lluvias (Stegmann, Heyer & Cossu, 2005; Melo, Ferreira & Paixao, 2015), de igual forma lo incluyen los textos de la Organización de Panamericana de la Salud (2007), experiencia basada en países donde el porcentaje de materia orgánica putrescible no excede el 30% (Collazos, 2008; Díaz & de Janon, 2010; Lobo, López, Cobo & Tejero, 2008; Rosendal & Hjelmar, 2017; Staley & Barlaz, 2009; Valencia, van der Zon, Woelders, Lubberding & Gijzen, 2009), mientras que los registros del relleno sanitario de Guayaquil demuestran que la producción de lixiviados, se inició sin presencia de lluvias.

Los lixiviados generados por la descomposición de la materia orgánica son contaminantes de los medios acuáticos, por tener concentraciones mayores a 400 veces en DBO y DQO, 1500 veces en cobre, 300 veces en hierro, etc, y

al no tener sistema de tratamiento y/o eliminación (en Guayaquil se eliminan los lixiviados) pueden contaminar los medios acuáticos para vertido en cuerpos de agua (TULSMA, 2015); el no acreditar la posibilidad de que un vertedero o RS pueda producir lixiviados sin presencia de líquidos, lluvias o aguas adicionales y cuando no se da el tratamiento adecuado permitiría que éstos contaminantes acaben con la vida acuática de los acuíferos ubicados en sus áreas circundantes, esto motivó a investigar cuáles son los componentes más significativos de los residuos sólidos que producen lixiviados, analizarlos individualmente en condiciones aerobias y anaerobias, con temperaturas similares a las obtenidas en los rellenos sanitarios, para determinar sus curvas de producción diaria de lixiviados. También se investigó la producción de lixiviados de RSU, con diferentes combinaciones entre sus componentes en lisímetros y en celdas “tipo” (experimentales) obteniendo producciones de lixiviados sin adición de agua, luego se modelaron las producciones diarias, comparando los resultados de volúmenes acumulados.

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema general

Considerando que la descomposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) genera líquidos (lixiviados) y gases, y generalmente la producción de lixiviados se atribuye a la influencia de las lluvias, ¿es posible demostrar que los RSU de Guayaquil sí producen lixiviados sin adición de agua externa, y determinar su producción mediante la modelación de los resultados obtenidos en celdas “tipo” (experimentales), lisímetros y en laboratorio?

1.2.2 Problemas específicos

¿Cuáles son los componentes y sus proporciones, que constituyen la materia orgánica putrescible de los RSU de Guayaquil, que se descomponen en lixiviados?

¿Cuál es la producción de lixiviados de los componentes putrescibles de los RSU sin adición de agua, medidos en laboratorio simulando las condiciones de operación de un relleno sanitario?

¿Cuál es la producción de lixiviados en lisímetros (tanques), con diferentes composiciones de materia orgánica putrescible (100, 60, 50 y 30%) y en celdas “tipo” (experimentales) de 400 t de RSU, sin influencia de aguas lluvias?

¿Cuál es la relación entre las modelaciones de las producciones de lixiviados en lisímetros, celdas y en los componentes de la materia orgánica putrescible medidos en laboratorio, para las condiciones de la composición de los RSU de Guayaquil?

1.3. Justificación teórica

El presente trabajo pretende contribuir con conocimientos científicos, generar reflexión, debate académico y tecnológico sobre la producción de los lixiviados de los RSU, para lo cual se tomaron como referencia los resultados de los componentes orgánicos putrescibles medidos en laboratorio, lisímetros a escala piloto de RS y de celdas “tipo” de RS, para confrontar la teoría generalizada, que atribuye la generación de los lixiviados exclusivamente a la influencia de aguas lluvias.

Los resultados de la investigación servirán como base para modelaciones de la producción de los lixiviados de los rellenos sanitarios o vertederos no controlados de regiones con condiciones semejantes a las de Guayaquil.

1.4. Justificación práctica

La información de la literatura internacional sobre la producción de lixiviados de los rellenos sanitarios, generalmente menciona que éstos sólo se generan en épocas de lluvia, por lo que no se cuantifica su producción en épocas secas, por lo que este desconocimiento repercute en contaminación, en especial a los ecosistemas acuáticos cuyos costos de recuperación no se determinan fácilmente, y normalmente se busca remediarlos cuando ya es muy tarde. Por ello, normalmente este tipo de problemas ambientales se los debe tratar con el método de “costos evitados”, lo que redundará en la

necesidad de determinar la producción real de lixiviados de los RSU, lo cual, a su vez, constituye una justificación económica.

La investigación tiene un beneficio ambiental al hacer conciencia pública dado que la composición física, química y bacteriológica de los lixiviados tiene concentraciones elevadas de DBO, DQO, residuos totales, nitrógeno total, cloruros, fósforo total, metales pesados; gases como: metano, CO, CO₂ y microorganismos. Estos elementos tienen impacto en el aire, suelo y, especialmente, en medios acuáticos, ya que generan desoxigenación del agua superficial, incremento de las células inhibidoras de luz, aumento en la salinidad, altos niveles de nitrificación, toxicidad en el medio, biomagnificación, bioacumulación. (El-Fadel, Findikakis & Leckie, 1995; van Breukelen, et. al., 2003; Rapti-Caputo & Vaccaro, 2006; van Turnhout & Heimovaara, 2017) y por contaminación de metales pesados (González, et al 2018), en los casos en que no existe control de ingresos, llegan también residuos hospitalarios con consecuente contaminación (Perez, et. al., 2017). Existen muchas ciudades en la costa de Perú y Ecuador, entre ellas Lima, con bajas precipitaciones anuales (Bardales, 2015) y RSU con altos contenidos de materia orgánica putrescible, esta investigación contribuirá con información para proyectar su producción de lixiviados.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar la modelación de la producción de lixiviados que se genera en los componentes putrescibles de los residuos sólidos urbanos de Guayaquil sin adición de agua, para determinar el impacto negativo en acuíferos de su área de influencia.

1.5.2. Objetivos específicos

Determinar los componentes y sus proporciones que constituyen la materia orgánica putrescible de los RSU de Guayaquil, que se descomponen en lixiviados.

Determinar las curvas de producción de lixiviados de los componentes putrescibles de los compuestos orgánicos de los RSU sin adición de agua medidos en laboratorio en condiciones similares a las de un relleno sanitario.

Determinar las curvas de producción de lixiviados en lisímetros con diferentes niveles de composición de materia orgánica al 100, 60, 50 y 30% sin influencia de aguas lluvias y en celdas “tipo” (experimentales) de RS, sin influencia de aguas lluvias.

Comparar los resultados de las modelaciones de las producciones de lixiviados en: lisímetros, celdas “tipo” y los obtenidos de los componentes de la materia orgánica putrescible medidos en laboratorio, con los obtenidos en tres sectores del relleno sanitario de Guayaquil.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco filosófico de la investigación

Popper (2016, p. 21) expresa que al menos existe un problema filosófico, a saber, el problema de entender el mundo. Éste es el problema de la cosmología; toda la ciencia es cosmología. También, expresa que no hay método propio de la filosofía para la búsqueda de la verdad y que el mejor modo de estudiar la expansión del conocimiento es estudiar el “conocimiento científico”.

El individuo de ciencia propone enunciados, los cuales se contrastan paso a paso. En el campo de las ciencias empíricas, se construyen hipótesis y se las evalúa por medio de observaciones y experimentos (Popper, 2016). En el siglo XVIII Antoine-Laurent Lavoisier demostró que ‘la materia no se crea ni se destruye, solo se transforma’, por lo que todo componente putrescible de los RSU genera lixiviados y gases, dependiendo de la temperatura, su producción es más rápida o lenta, dependiendo de su presión o exposición al aire o no, la influencia de la presión circundante hace que se produzca más o menos lixiviados, los niveles de retención dependen de la proporción de la MOP, esta producción se retendrá por la adsorción de los materiales, retención en las fundas plásticas y en las arcillas usadas para la cobertura diaria de las celdas, etc.

2.2 Antecedentes de investigación

La producción de lixiviados ha sido investigada desde el año 1960. Posteriormente, Naylor et. al. (1978) presentan una fórmula de cálculo de la ecuación del balance de agua para rellenos sanitarios:

$$P = ET + L + R + \Delta U_s + \Delta U_w \quad \text{Ec. 01}$$

Donde:

L= producción de lixiviados (m³ por año)

P= precipitación (m³ por año)

R= escorrentía superficial (m³ por año)

ΔU_s = cambio en el almacenamiento de la humedad del suelo (m^3 por año)

ET= pérdidas por evaporación real del suelo descubierto/pérdidas por evapotranspiración de una superficie con vegetación (m^3 por año).

ΔU_w = cambio en el contenido de humedad de los componentes de residuos (m^3 por año).

Los rellenos sanitarios que reciben más de 750 mm de precipitación anual producen lixiviados (Keenan, 1986) mientras que, en climas donde la precipitación es menor a 400 mm, virtualmente toda la precipitación es evapotranspirada (Saxton, 1983). Estas afirmaciones confirman el concepto de que los porcentajes de materia orgánica putrescible en los RSU de los Estados Unidos de Norte América y Europa del Norte no son significativos, incluso con intensidades bajas de lluvias no producen lixiviados.

Los niveles de absorción para rellenos con residuos domésticos (Campbell, 1983) que, para el tipo de residuos en Inglaterra, frecuentemente, se usa la humedad en el 35% de su masa seca; la densidad de los residuos es de 0,7 a 0,8 t/m^3 y la capacidad de absorción es de 0,16 a 0,27 $m^3/t.$, cuando la densidad de los residuos es 1 t/m^3 , la capacidad de absorción es de 0,02 a 0,03 m^3 por tonelada seca; concluye que los resultados de rellenos experimentales demuestran que es inapropiado el usar referencias regionales o nacionales para lluvias y datos de evaporación/evapotranspiración, y recomienda que se lleve a cabo una evaluación cuidadosa de la interacción entre las lluvias y condiciones del área, sin embargo no considera la proporción ni composición de los materiales putrescibles de los RSU.

La experiencia durante cinco años, en un relleno sanitario en Edmonton, demostró que los niveles de permeabilidad de las aguas lluvias corresponden del 39 al 50%. En este caso, nuevamente, se asume que el nivel de infiltración de las lluvias es el que produce lixiviados y el relleno, más bien, se convierte en un receptor que no permite un flujo libre (Canziani & Cossu, 1989).

Según Christensen, Cossu & Stegmann (1992) en la mayoría de los climas, la lluvia y nieve causan infiltración de agua en el relleno sanitario y después de la saturación de los desechos genera lixiviados y la capacidad de absorción de los residuos del relleno sanitario y sus características de retención son muy difíciles de especificar debido a la heterogeneidad de los residuos. En esta conclusión, se establece que existe una particularidad de la producción dependiendo de la no definición general de los residuos, sin mencionar los porcentajes de componentes putrescibles

HELP (por sus siglas en inglés, Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) es un modelo bidimensional que considera el movimiento vertical y lateral del agua en un relleno. Está basado en la escorrentía superficial, la evapotranspiración, el contenido de humedad de las diferentes capas y las características de cada una de ellas; el modelo requiere datos climatológicos, características de suelo y diseño del relleno. Únicamente genera estimaciones de cantidad de lixiviados, más no predice su calidad, permite diseñar o evaluar sistemas de drenaje en rellenos sanitarios (Castro, 1993). Los resultados pueden ser obtenidos diaria, mensual o anualmente, su precisión está limitada por la calidad de los datos que sean suministrados al programa (Castro, 1993), el cual requiere de información relacionada con lo siguiente:

- Datos climatológicos de la localidad
- Características de diseño del relleno y los suelos que conforman sus diferentes capas.

HELP está basado principalmente en experiencia de los EEUU, considera las condiciones de temperatura, humedad, evapotranspiración, pero se da mayor importancia a las capas de cobertura, los niveles de escurrimiento por el tipo de vegetación que se use en las coberturas y la capacidad de infiltración de las aguas lluvia o nieve, sin embargo, no analiza los componentes de la materia orgánica putrescible y no considera el aporte de lixiviados que esta produce. (Castro, 1993).

Tchobanoglous et al. (1998) definen el lixiviado como el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión. Está formado por el líquido que entra en el vertedero desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos).

Según Tchobanoglous et al. (1998), la ecuación del balance de agua es la siguiente:

$$\Delta S_{rs} = W_{rs} + W_{FT} + W_{MC} + W_{A(u)} + W_{GV} + W_{VA} + W_E + W_{F(L)} \quad \text{Ec. 02}$$

Donde:

ΔS_{rs} = variación en la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el vertedero, kg/m^3 .

W_{rs} = agua (humedad) en los residuos sólidos entrantes, kg/m^3 .

W_{FT} = agua (humedad) en los lodos de plantas de tratamiento entrantes, kg/m^3 .

W_{MC} = agua (humedad) en el material de cobertura, kg/m^3 .

$W_{A(u)}$ = agua filtrada superiormente (para la capa superior del vertedero el agua desde arriba procede de la lluvia o del agua de nieve), kg/m^3 .

W_{GV} = agua perdida en la formación del gas de vertedero, kg/m^3 .

W_{VA} = agua perdida como vapor de agua saturado con el gas de vertedero, kg/m^3

W_E = agua perdida debido a la evaporación superficial, kg/m^3

$W_{F(L)}$ = agua que sale inferiormente (en la celda localizada directamente por encima de un sistema para la recogida del lixiviados, el agua del fondo se corresponde con el lixiviados, kg/m^3

Finalmente, los autores expresan que para determinar si se formarán lixiviados, se compara la capacidad de campo del vertedero con la cantidad de agua presente. Si la capacidad de campo es menor que la cantidad de agua presente, se generan lixiviados. También, mencionan que por lo general, la cantidad de lixiviados está en función directa de la cantidad de agua externa que entra en el vertedero. Si bien en la ecuación del balance de aguas se considera el agua que sale de los residuos sólidos, en la expresión final mencionan que la producción de lixiviados tiene relación directa con la

capacidad de campo del relleno. Esto le da las características de un medio absorbente, más no productor de lixiviados.

El método Suizo (Orth, 1981) no hace referencia a la composición de los residuos, solo relaciona las precipitaciones con el área de aportación y el nivel de compactación. Este método usa coeficientes empíricos que correlacionan el área de contribución de la precipitación y el relleno con la generación de lixiviados. El cálculo del flujo promedio lo expresa en la siguiente ecuación:

$$Q_M = (R \times A \times K) / t \quad \text{Ec. 03}$$

En donde:

Q_M = Flujo de lixiviados (l/s)

R = precipitación máxima mensual (mm)

A = área (m²)

K = coeficiente que depende del grado de compactación de los RSU

t = número de segundos en un mes.

Los valores de K para el método Suizo dependen del tipo de relleno sanitario y la masa específica de RSU compactados; en rellenos compactados débilmente con un masa de RSU de 0.4 a 0.7 t/m³ el valor de K es de 0.25 a 0.50, mientras que en los rellenos fuertemente compactados que superan las 0.7 t/m³, el valor de K será entre 0.15 y 0.25, esta fórmula corresponde a factores relacionados sobre una producción de lluvia, al tener lluvia cero la ecuación es cero.

Qasim & Chiang (1994) también atribuyen la producción de lixiviados al “agua que pasa a través del relleno sanitario lo convierte en lixiviados y que la mayor fuente de agua son las precipitaciones”, los que proponen fórmulas similares para calcular la producción de lixiviados basadas en las precipitaciones, donde se puede evidenciar que esta siempre es menor a la cantidad de las precipitaciones, con estas expresiones, se mantiene el concepto de relacionar la producción de los lixiviados con la influencia de las precipitaciones exclusivamente. La cantidad de infiltración en el vertedero se puede

considerar que será igual a la precipitación media anual. Este concepto también relaciona exclusivamente la producción de lixiviados con las precipitaciones (LaGrega, Buckingham & Evans, 1996).

Investigaciones de varios autores sobre producción de lixiviados en vertederos sugiere que la producción de lixiviados depende de la entrada de agua de lluvia, lodo de las plantas de tratamiento, etc. (Melo, Ferreira & Paixao, 2015; Stegmann, Heyer & Cossu, 2005; Tchobanoglous et al., 1998), los que consideran tienen desarrollado una descomposición microbiana anaerobia y aerobia (Chofqui et. al., 2004; Mukherjee, et. al., 2015; Slack et. al., 2005). Sin embargo, esas investigaciones corresponden generalmente a experiencias europeas y norteamericanas, donde la fracción de desperdicios de alimentos en los RSU es menor al 30% (Collazos, 2008; Díaz & de Janon, 2010; Staley & Barlaz, 2009; Rosendal & Hjelmar, 2017; Valencia et al., 2009), mientras que, en ciudades como Guayaquil, Lima y otras ubicadas en América Latina, otras en Asia, África etc., donde la fracción orgánica en RSU es alta (mayor o igual 50%), el vertedero produce lixiviados todo el año, incluso durante la estación seca cuando la precipitación es mínima o nula.

Existen otros métodos para estimar la producción de lixiviados en rellenos sanitarios, entre esos:

- LEAF (Lixiviación del Marco de Evaluación Ambiental) Método EPA 13141 partición líquido-sólido (L/S) en función de la relación líquido-sólido para constituyentes en materiales sólidos utilizando un procedimiento de columna de percolación de flujo ascendente (Thorneloe et al., 2013) en este método se utiliza agua a presión, por lo que se distorsiona del concepto de producción de lixiviados sin presencia de agua.
- Métodos basados en componentes orgánicos, por sus moléculas, separándolos en grasas, carbohidratos y proteínas, para determinar mediante fórmulas matemáticas los posibles elementos de los gases y lixiviados (Zacharof & Butler, 2004). Considerando que los RSU tienen una muy alta heterogeneidad en sus componentes producto de la condición

cíclica de ciertos componentes orgánicos, difícilmente puede conseguir un elemento matemático para determinar una exacta producción de lixiviados, sin embargo, con estos cálculos se determina la producción potencial de lixiviados, el que para determinar la producción en un relleno sanitario deberá definir los niveles de retención, con este método tampoco determina el tiempo de degradación de cada componente o en su conjunto.

- Modelo para determinar la producción de lixiviados bajo la influencia de agua o líquido agregado, basado en el intercambio de agua entre dos flujos dominantes en dos dimensiones; "campo de flujo" que consiste en un camino vertical llamado "dominio de canal" rodeado por la masa de residuos considerado como dominio matricial; para este modelo se aplica el software HYDRUS-2D (Fellner & Brunner, 2010)

Para el desarrollo de este método y determinar la producción de lixiviados se le tiene que agregar agua adicional.

- Software HELP (Evaluación hidrológica del rendimiento del relleno sanitario) que presenta el modelo más comúnmente aplicado para medir el equilibrio hídrico, también fue analizado por Berger (2015), Schroeder & Tamsen, (1994) quienes sintetizan que el modelo utiliza dos dimensiones: vertical (a precipitación, evapotranspiración, infiltración, saturada y flujos insaturados) y flujo lateral (a escorrentía superficial y drenaje lateral); también analiza la combinación de estos flujos. Los datos requeridos son: intensidad de lluvia, evaporación, transpiración, estructura geológica y capas de vertedero y estructura geológica. Sin embargo, (Marques & Vilar, 2003) muestra que los resultados de la producción de lixiviados en lugares tropicales que aplican el modelo HELP son mucho más bajos que los generados, debido a que la biodegradación de la fracción orgánica (alimento, desperdicio) no es considerada.

Los lixiviados que se producen en un relleno sanitario dependen de los siguientes factores: la precipitación, el área de relleno, el modo de operación y el tipo de basura (Röben, 2002). Este es un sistema que conceptualmente relaciona a las precipitaciones influenciadas por el área de relleno, tipo de basura, etc., pero en el caso de no haber lluvias no hay lixiviados, esta fórmula

se aplica generalmente en Ecuador y en muchos países de Sudamérica como un referente.

El balance superficial de agua se da mediante la siguiente ecuación (Collazos, 2008):

$$P=I+ES \quad \text{Ec. 04}$$

Donde:

P= precipitación (m³/año)

I= infiltración (m³/año)

ES= escorrentía (m³/año)

Una vez infiltrada el agua de precipitación, esta tiene los siguientes destinos: acumularse en la capa de cobertura, evapotranspirarse realmente o percolar hacia la basura subyacente. El balance de agua en la capa del material de cobertura es entonces el siguiente (Collazos, 2008):

$$I= ER+PER+AC \quad \text{Ec. 05}$$

Donde:

ER= evapotranspiración real (m³/año)

PER= percolado (m³/año)

AC= cantidad acumulada por efecto de la infiltración (m³/año)

Posteriormente (Collazos, 2011) complementa los conceptos indicando que la producción de lixiviados se da por dos motivos, la descomposición de los residuos y la lluvia que cae en los terrenos de los rellenos sanitarios. Estos se presentan con el nombre de Método CORENOSTÓS, que sí considera la descomposición de los residuos, aunque asume varios conceptos: la máxima producción se da a los dos años, después del quinto año decrece y luego cesa.

Existen diversas investigaciones en las que se usan biorreactores para analizar el efecto de la temperatura en las propiedades de biodegradación y asentamientos de los residuos sólidos municipales en una ciudad de China (Yan et al., 2016). En la Figura 1 se observa la producción de lixiviados a través del tiempo (360 días) que resultó de hacer un análisis a una muestra de residuos con una composición del 10%, 20%, 35%, 50%, 60% y 100% de

materia orgánica. En los primeros 60 días, se observa una producción de hasta 235 ml/día; luego decrece la producción y, entre los 150 y 210 días, vuelve a aumentar hasta 250 ml/día. Esta situación difiere con la de Guayaquil, ya que no se presentan incrementos de volúmenes de lixiviados a los 210 días. Sin embargo, las condiciones tomadas no son exactamente iguales, ya que este análisis considera como materia orgánica el papel y el plástico (ver Figura 1), éstos si bien tienen componentes orgánicos, no son putrescibles de rápida descomposición, más bien, pueden convertirse en almacenadores de líquido. Por esta razón, en el caso de Guayaquil, no se consideran estos materiales dentro de clasificación de materia orgánica putrescible.

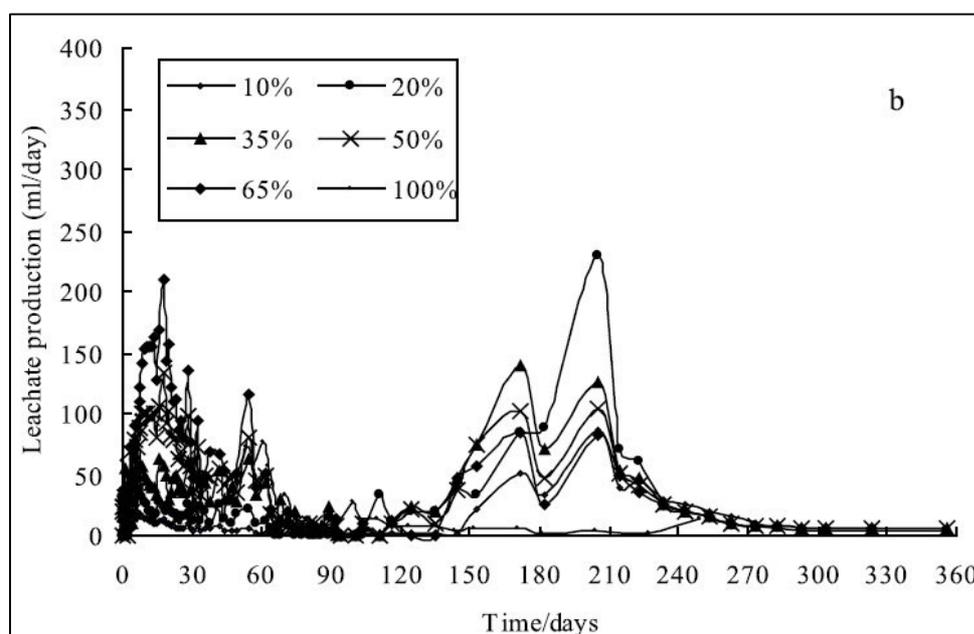


Figura 1 Variación de producción de lixiviados con diferentes concentraciones de materia orgánica versus tiempo. Yan et al. (2016)

En el Cuadro 1, se presenta una comparación de los modelos HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance), Sao Mateus (Sao Mateus, Machado & Barbosa, 2012), Lobo y Tejero (Lobo & Tejero, 2007), De Velásquez (Orta de Velasquez, et. al., 2003) y Pantini et. al. (2013). Se muestra que los otros proyectos no tienen condiciones de operación para celdas individuales, no consideran la compresión de los residuos ni flujo horizontal ni sistema de multi-capas, biodegradación, producción de gas, pérdida por vapor, cambios temporales de las propiedades de los residuos,

etc. Sin embargo, Pantini et. al. (2013) consideran que el porcentaje de humedad de los residuos es un valor fijo y su cálculo está basado en un aporte de lluvias para producir lixiviados.

Cuadro 1 Comparación del modelo de Pantini con otros modelos hidrológicos de producción de lixiviados

Características	HELP	Sao Mateus et. al. (2012)	Lobo and Tejero (2007)	De Velasquez et. al. (2003a)	Pantini
Etapa operativa (disposición progresiva de residuos)	N	NS	Y	Y	Y
Período posterior	Y	Y	Y	Y	Y
Vertedero de discretización	Y	Y	Y	Y	Y
Flujo vertical	Y	Y	Y	Y	Y
Flujo horizontal	Y	N	Y	N	Y
Sistema de recubrimiento multicapa	Y	NS	Y	NS	Y
Diferentes tipos de residuos	Y	Y	Y	Y	Y
Humedad inicial de los residuos	Y	Y	Y	Y	Y
Evapotranspiración potencial	Y	Y	Y	Y	Y
Evapotranspiración real	Y	Y	Y	Y	Y
Escorrentía superficial	Y	Y	Y	Y	Y
Agua retenida / liberada por el suelo de cobertura	Y	Y	N	Y	Y
Capacidad de almacenamiento de agua	Y	Y	Y	Y	Y
Comprensión de residuos	N	Y	Y	Y	Y
Agua liberada	N	Y	Y	Y	Y
Biodegradación	N	Y	Y	N	Y
Producción de biogás	N	Y	Y	N	Y
Reducción de residuos por biodegradación	N	Y	N	N	Y
Consumo biótico	N	Y	N	N	Y
Pérdidas de vapor	N	Y	N	N	Y
Cambios temporales de las propiedades de los residuos	N	Y	Y	Y	Y

Fuente: (Pantini, Verginelli & Lombardi, 2013)

Es necesario tener en cuenta que el oxígeno, el agua y la temperatura adecuada aceleran la oxidación y descomposición de la fracción orgánica de los rellenos sanitarios y la consecuente generación de lixiviados. La descomposición de los RSU puede causar gases de efecto invernadero y contaminación del agua, de tal manera que el Parlamento Europeo pretende reducir el 50% del desperdicio de alimentos para 2030 (Hafner et. al., 2017), es claro que la reducción significativa de la fracción orgánica evita la producción de lixiviados incluso sin presencia de agua.

2.2.1 Ensayos relacionados con producción de lixiviados

Entre los métodos estándar para el examen de agua y aguas servidas, (Standard Methods for the Examination of water and wastewater 23rd edition 2017) no se presenta un método para determinar la producción de lixiviados, sin embargo presenta la prueba 2540B Standard Methods SM Total Solid Dried (Secado total de Sólidos) a 103-105 grados centígrados, el que determina el total de sólidos que queda después de “disecar” el material, si bien esta es una prueba de desecación, es utilizada para determinar la humedad de los componentes pero no se ajusta a las condiciones de producción de lixiviados en un relleno sanitario cuya temperatura es alrededor de 50 grados centígrados, en el mismo capítulo o apartado 2000, especifica la prueba 2540 F asentamiento de sólidos, la que determina la masa o volumen de los sólidos de las basuras, este método usa un cono Imhoff, donde mide los niveles de asentamiento de los sólidos en líquidos, la que no determina la producción de lixiviados. En el mismo apartado se menciona el método 2710 H Tiempo de filtrado (Time to Filter), éste método usa un embudo de Buchner para lodos, el que tiene un filtro y aplicando un vacío se determina el tiempo para adquirir 100 ml de material filtrado, método que tampoco se aplica a las condiciones de un relleno sanitario.

También se buscaron los métodos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y en especial los métodos de ensayos para residuos sólidos y residuos peligrosos SW 846, con el método 9000 para la determinación de contenido de agua de los RSU por el valorador de Karl Fisher (Determination of water in Waste material by Karl Fisher Titration), este método usa un valorador Coulométrico determinando la cantidad de agua que tiene la muestra, también determina otros elementos del agua usando un electrodo generador, con resultados rápidos inmediatos y totales, este método indica el total del agua en los elementos pero no determina la producción de los líquidos en el tiempo. De igual forma, el método 9001 Determinación del agua en materiales de RSU por el método cuantitativo de reacción de hidruro de calcio, es capaz de determinar la cantidad de agua en materiales líquidos y sólidos y mezclas de agua /alcohol, el que tiene la misma condición del método anterior que no determina la producción de los líquidos en el tiempo. Existen otros métodos como 3511 que determina los compuestos orgánicos

en agua, se relaciona con la extracción de selectos compuestos orgánicos volátiles y semi volátiles, pero no de producción de lixiviados, entre los procedimientos relacionados con lixiviación tenemos el método 1315 Tasas de transferencia masiva de elementos en materiales granulares monolíticos o compactados, utilizando un procedimiento de lixiviación de tanques semi-dinámicos, este método es usado para materiales sólidos o granulares compactados, que se comportan como monolito, en el que el flujo de agua predominante está alrededor del material y la liberación se controla por difusión al límite, condición que no es igual a la de producción de lixiviados de cada elemento porque lo que se pretende es determinar cuánto produce de lixiviados sin adición de agua.

Al analizar el método EPA 1316 Partición líquida-sólida como función de la relación líquido-sólida en materiales sólidos mediante un procedimiento de lote paralelo, se destaca que este método está diseñado para proporcionar la partición líquido-sólida de constituyentes inorgánicos y constituyentes orgánicos no volátiles, en un material sólido granular en función de la relación líquido a sólido en condiciones de percolación. Para desarrollar el proceso el eluyente se introduce en una columna de material granular moderadamente empaquetado en un modo de bombeo de flujo ascendente con la recolección del eluato (sustancia obtenida de un proceso de extracción de una sustancia absorbida desde un lecho poroso o columna de cromatografía disolvente) siendo el eluyente, para la mayoría de los casos, agua reactiva. Este sistema usa agua para determinar los componentes que percolan y su producción es forzada con bombas, buscando otros objetivos y no la producción de lixiviados en el tiempo, los métodos EPA 1314 (Partición líquida -sólida como una función de la relación líquido-sólida para los componentes en materiales sólidos utilizando un procedimiento de columna de percolación de flujo) y 1313 (Partición líquido-sólido como función del Ph del extracto mediante un procedimiento de extracción en lote paralelo) son de igual forma procedimientos para determinar componentes de lixiviados que trabajan con adición de agua. Analizando los métodos para producción de lixiviados del ASTM D4874-95 Método estándar de prueba para la lixiviación de material

sólido en una columna de aparato, donde el análisis de la columna de efluentes proporciona información sobre lixiviación de las características de material en las condiciones utilizadas en la prueba, en la cámara de la columna se puede hacer análisis de semi volátiles y compuestos no volátiles así como inorgánicos, si bien con este método se puede determinar la producción de lixiviados que se depositen en la columna, no considera la posibilidad de establecer diferentes condiciones de temperatura ni la medición en el tiempo de la producción de lixiviados.

En los modelos generalmente usados para determinar la producción de lixiviados se hace referencia a las precipitaciones y a un contenido de humedad inicial, que se calcula usando métodos de pérdidas de humedad por secado para compuestos orgánicos como carne (AOAC Official Method 950.46) el que consiste en secar el elemento orgánico usando un horno a 100–102 grados centígrados hasta conseguir una masa constante, aunque con este método se obtiene a más de humedad del elemento, vapor y gases; método semejante al SM 2540B.

2.2.2 Composición de los residuos

La caracterización de los RSU de cada ciudad, es el reflejo de los hábitos de consumo y guardan relación con su evolución económica, sin que necesariamente siga un patrón exacto.

Tchobanoglous et al., (1998) hace una caracterización de los RSU distribuidos en 15 componentes, clasificados en componentes orgánicos e inorgánicos (Cuadro 2).

Cuadro 2 Componentes de residuos sólidos (EEUU)

Componente	Porcentaje en masa	Contenido en humedad (%)	Masa seca* (kg)
Orgánicos			
Residuos de comida	9	70	2,7
Papel	34	6	32
Cartón	6	5	5,7
Plásticos	7	2	6,9
Textiles	2	10	1,8
Goma	0,5	2	0,5
Cuero	0,5	10	0,4
Residuos de jardín	18,5	60	7,4
Madera	2	20	1,6
Orgánicos misceláneos	-	-	-
Inorgánicos			
Vidrio	8	2	7,8
Latas de hojalata	6	3	5,8
Aluminio	0,5	2	0,5
Otros metales	3	3	2,9
Suciedad, cenizas, etc.	3	8	2,8
Total	100	21,2	78,8

Fuente: Gestión Integral de Residuos Sólidos (Tchobanoglous et.al, 1998, p. 85)

Según el Cuadro 2, el 21% de los RSU de los Estados Unidos es humedad, vale aclarar que este término (humedad) implica líquidos, vapor y gases ya que se obtiene mediante un proceso de desecación a 100 grados centígrados. También es claro que en esta clasificación, los productos putrescibles de rápida descomposición son los residuos de comida y jardín, los que suman el 27,5% (residuos de comida y jardín) de la masa de todos los residuos. Sin embargo, estos dos componentes constituyen el 82% del contenido de “humedad” de toda la clasificación.

La composición química de los componentes de RSU es la siguiente:

Cuadro 3 Composición química de los residuos sólidos

Componente	Masa húmeda (kg)	Masa seca (kg)	Composición (kg)					Cenizas
			C	H	O	N	S	
Residuos de comida	9	2,7	1,3	0,17	1,02	0,07	0,01	0,14
Papel	34	32	13,92	1,92	14,08	0,1	0,06	1,92
Cartón	6	5,7	2,51	0,34	2,54	0,02	0,01	0,28
Plásticos	7	6,9	4,14	0,5	1,57	-	-	0,69
Textiles	2	1,8	0,99	0,12	0,56	0,08	-	0,05
Goma	0,5	0,5	0,39	0,05	-	0,01	-	0,05
Cuero	0,5	0,4	0,24	0,03	0,05	0,04	-	0,04
Residuos de jardín	18,5	6,5	3,11	0,39	2,47	0,22	0,02	0,29
Madera	2	1,6	0,79	0,1	0,68	-	-	0,02
Total	79,5	58,1	27,39	3,62	22,97	0,54	0,1	3,48

Fuente: Gestión Integral de Residuos Sólidos (Tchobanoglous, et.al, 1998, p. 94)

La composición química de los componentes que constituyen los residuos sólidos urbanos (Cuadro 3) lo configuran básicamente carbono, hidrógeno oxígeno y cenizas; el carbono y el oxígeno son los que tienen mayor masa y su porcentaje total es el 50%.

Díaz & de Janon (2010) presenta la composición y fuente de los residuos sólidos por tipo (Cuadro 4), esta clasificación corresponde a la generalidad de conceptos relacionados con los tipos de residuos como generalmente se los identifica y los lugares donde los generan.

Cuadro 4. Materiales de los residuos sólidos municipales por tipo, composición y fuentes

Tipo	Componentes	Fuente principal
Residuos de alimentos	Residuos de la preparación, cocción y servicio de alimentos; residuos del mercado; residuos del manejo, almacenamiento y venta de productos	Viviendas, restaurantes, supermercados, mercados
Escombros	Combustible: papel, cartones, cajas, barriles, madera, virutas, muebles de madera, desperdicios de aserraderos, plástico	Viviendas, negocios comerciales, industria
Residuos del jardín	Hojas, residuos del jardín, recortes, poda	Residencias, lugares públicos
Residuos del barrido de calles	Barreduras, polvo, hojas, polvo del sumidero	Municipios
Cenizas	Residuos de fogatas empleadas para cocinar y calentar, y para la incineración en el sitio	Viviendas, incineradores, industria
Peligrosos	Materiales radioactivos explosivos tóxicos, patógenos y altamente inflamables	Viviendas, hoteles, hospitales, instituciones, tiendas, industria
Animales muertos	Gatos, perros, caballos, vacas y otros	Calles, veredas, callejones, lotes vacíos
Vehículos abandonados	Carros, camiones abandonados en propiedad pública	
Residuos industriales	Residuos del procesamiento de alimentos, escorias de las calderas de casas, residuos de la madera, residuos de metales, virutas	
Residuos de la demolición	Madera, tuberías, ladrillo, albañilería y otros materiales de construcción de edificios demolidos y otras estructuras	Sitios de demolición a emplearse como edificios nuevos, proyectos de renovación, caminos de acceso limitado
Residuos de la construcción	Residuos de la madera, tuberías y otros materiales de construcción	Construcción nueva, remodelación

Fuente: Reciclaje y tratamiento biológico de los residuos sólidos municipales (Díaz & De Janon, 2010, p. 22).

Adicionalmente, presentan también la composición de residuos en porcentaje de masa húmeda de diferentes ciudades en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Cantidad composición de los residuos sólidos municipales (porcentaje de masa húmeda)

Material	India urbana	Manila, Filipinas	Asunción, Paraguay	Ciudad de México, México	Cali, Colombia	Asentamiento de Sasha, Ibadan, Nigeria	Berkeley, CA, EEUU	Cond. De Broward, Florida, EEUU
Putrescible	75	48,8 ^a	60,8 ^b	56,4	66,5	76	39 ^c	39,8
Papel	2	17	12,2	16,7	14	6,6	40,1	37,8
Metales	0,1	1,5	2,3	5,7	1,1	2,5	3	5,6
Vidrio	0,2	5,3	4,6	3,7	2,6	0,6	7,6	6,7
Plástico, caucho, cuero	1	6,5	4,4	5,8	11,1	4	6,3	9
Textiles	3	3,7	2,5	6	2	1,4	1,7	-
Cerámica, polvo, piedras	19	17,2	13,2	5,7	2,9	8,9	2,3	1,1
Masa/cápl/día (kg)	0,91	0,88	1,41	1,5	0,39	0,37	3,1	3,86

^a: basado en mediciones actuales; ^b: incluye pequeñas cantidades de madera; ^c: incluye residuos del jardín, residuos de alimentos y madera;

Fuente: Reciclaje y tratamiento biológico de los residuos sólidos municipales (Díaz & De Janon, 2010, p. 23)

El Cuadro 5 muestra las composiciones de residuos en algunas ciudades, lo que demuestra su heterogeneidad entre las ciudades con diferentes condiciones económicas. En el caso de Lima (Bardales , De la Cruz , & Cabrera , 2015) presenta una caracterización de los residuos destacando que la materia orgánica constituye el 61%, papel y cartón 8,4% y plástico 8,2%, valores muy similares a los de Guayaquil presentados por Collazos en el cuadro 6.

Collazos (2011) presenta la composición física de los residuos sólidos urbanos en varias ciudades:

Cuadro 6. Composición física de residuos sólidos

Elemento	Bogotá	EE.UU	Guayaquil	Ipiales	Villavicencio	Cali
Residuos alimentos	37	6	59	45	49	79,3
Papel y cartón	23	41	10	30	13	6,2
Plásticos	9	10,7	8	2	5	2,3
Textiles	4	2,4	2	5	2	0,8
Caucho	4	2,5	*	*	5	*
Madera	5	5	5	2	3	2,3
Vidrio	8	5,8	2	2	12	*
Metales	5	7,9	2	3	7	2,9
Otros	5	1	10	11	4	1,9
Poda	*	17,7	2	*	*	6,6
Totales	100	100	100	100	100	100

*Comprendido en otros

Fuente: Diseño y operación de rellenos sanitarios, Collazos (2011, p. 41)

En los datos presentados en los cuadros 5 y 6, se observa una relación inversa entre el contenido de la materia orgánica con las condiciones económicas de las ciudades.

Visvantahan et. al., (2003), del Instituto de Tecnología Asiático compara los porcentajes de los desechos biodegradables de los residuos sólidos urbanos de Asia con Europa y EEUU (China 52.6%, India 39.6%, Sri Lanka 64.7%, Europa 30%, USA (California) 24.1% donde demuestra claramente que los países asiáticos, quienes representan alrededor del 40% de la población mundial, tienen residuos biodegradables iguales o mayores al 40% , llegando

incluso a tener hasta 64%, mientras que Europa y Estados Unidos menores o iguales al 30%.

La Universidad de Michigan (2013) ha realizado una clasificación de los residuos sólidos urbanos de los EEUU donde los componentes altamente putrescibles son el 28%. Esto corresponde a materia orgánica putrescible (desechos de comida) más desechos de jardín; el papel es el 27%, lo que coincide con la mayoría de la información con que se dispone (Figura 2).

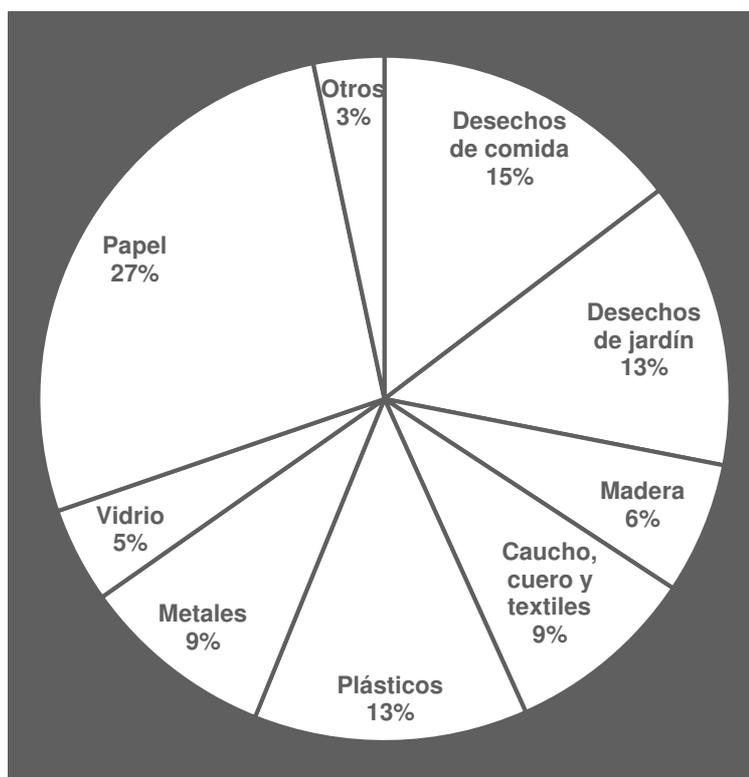


Figura 2. Composición de los residuos sólidos municipales de Estados Unidos 2013. Universidad de Michigan (2013)

La experiencia en poblaciones de España con más de 5000 habitantes (Prades, Gallardo & Ibáñez, 2014) presenta composiciones de RSU con 42% de orgánico, 21% de papel y cartón, 10% de plásticos, 7% de vidrio y otros con el 21%. Según Andrade & Mondelli (2017) en una colección de RSU selectivos de la sección central de la ciudad de Sao Paulo presenta la siguiente caracterización: 30,6% de plástico, 24,6% de papel, 8,1% de treta pack, 6,4% de metal, 11,45 de vidrio, 1,7% de poliestireno, 0,05% de componentes electrónicos y 17,3% de orgánicos.

De acuerdo a la tabla del Banco Mundial sobre las composiciones de los residuos sólidos municipales de los países con diferentes condiciones económicas, Cointreau (1982) presenta que los países industrializados tienen rangos de materiales putrescibles del 20% al 50% a diferencia de los países con ingresos bajos que llegan al 85% esto indica claramente que los resultados de producción de lixiviados sin presencia de agua, son diferentes.

Cuadro 7 Composición de los residuos sólidos municipales

Composición (% masa húmeda)	Países		
	Bajos ingresos	Medianos ingresos	Industrializados
Vegetales y materiales putrescibles	40 a 85	20 a 65	20 a 50
Papel y cartón	1 a 10	15 a 40	15 a 40
Plásticos	1 a 5	2 a 6	2 a 10
Metales	1 a 5	1 a 5	3 a 13
Vidrio	1 a 10	1 a 10	4 a 10
Caucho y cuero	1 a 5	1 a 5	2 a 10
Material inerte (cenizas, tierra, arena)	1 a 40	1 a 30	1 a 20
Otras características			
Contenido de humedad %	40 a 80	40 a 60	20 a 30
Densidad kg/m ³	250 a 500	170 a 330	100 a 170
Poder calorífico inferior kcal/kg	800 a 1.100	1.100 a 1.300	1.500 a 2.700
Fuente: Cointreau, Sandra J. Environmental management of urban solid wastes in developing countries. A project guide. Washington, DC: The World Bank.			

De acuerdo al Cuadro 7, Guayaquil está ubicado en las condiciones de países de bajo ingreso con niveles altos de material putrescible.

Según la información de la composición de los RSU de los 24 cantones (ciudades) que constituyen la provincia del Guayas (Consulaudi, 2010), sin considerar Guayaquil, presenta condiciones muy similares, donde los componentes orgánicos putrescibles son los de mayor presencia (Ver Cuadro 8).

Cuadro 8. Caracterización de los residuos sólidos en cantones de la provincia del Guayas con excepción de Guayaquil

CANTÓN	Prod t/día	Orgánicos		Plásticos		Cartón y papel		Vidrio	
	A	B	C=A*B	D	E=A*D	F	G=A*F	H	I=A*H
		%	t	%	t	%	t	%	t
Alfredo Baquerizo Moreno	7,65	59,2	4,53	11,6	0,89	9,4	0,72	2,4	0,18
Balao	12,16	76,8	9,34	7	0,85	6,6	0,8	0,8	0,1
Balzar	27,92	65,6	18,32	8,6	2,4	8,8	2,46	1,4	0,39
Colimes	3,24	62,8	2,03	8,2	0,27	13,4	0,43	3	0,1
Daule Cabecera Cantonal	109,33	60,4	66,04	9,6	10,5	14,4	15,74	2,6	2,84
Daule La Aurora	27,33	53	14,48	26,8	7,33	13,6	3,72	3	0,82
Durán	141,57	64,8	91,74	11	15,57	13,4	18,97	1,2	1,7
El Empalme	36,09	75,8	27,36	6,6	2,38	5,8	2,09	2,2	0,79
El Triunfo	24,05	53,8	12,94	11,2	2,69	9,6	2,31	1,6	0,38
General Elizalde	8,54	53,8	4,59	11,2	0,96	9,6	0,82	1,6	0,14
Isidro Ayora	6,77	73,4	4,97	7,6	0,51	5,8	0,39	2,8	0,19
Lomas de Sargentillo	12,16	64,2	7,81	9,6	1,17	8,8	1,07	1,6	0,19
Marcelino Maridueña	5,65	65,6	3,71	11,2	0,63	10,8	0,61	1,2	0,07
Milagro	121,65	61,2	74,45	13	15,82	10,8	13,14	5,4	6,57
Naranjal	36,52	65,2	23,81	9,6	3,51	11,4	4,16	4,2	1,53
Naranjito	27,94	67,4	18,83	9,6	2,68	7,4	2,07	1,6	0,45
Nobol	12,18	69,6	8,48	11,4	1,39	5,8	0,71	2,4	0,29
Palestina	8,59	67,8	5,82	8,4	0,72	9	0,77	1,2	0,1
Playas	39,98	52,4	20,95	11,8	4,72	12,6	5,04	4,6	1,84
Pedro Carbo	23,85	53,6	12,78	15,8	3,77	15,6	3,72	2,2	0,52
Salitre	8,11	63,4	5,14	12,2	0,99	5,6	0,45	3,6	0,29
Samborondón Cab. Cant.	18,94	52,2	9,89	19	3,6	16,6	3,14	3,8	0,72
Samborondón La Puntilla	191,5	45,9	87,9	13	24,9	23,8	45,58	0,6	1,15
Santa Lucía	10,1	59,6	6,02	14	1,41	10,8	1,09	3,8	0,38
Simón Bolívar	20,22	67	13,55	9	1,82	5	1,01	1,2	0,24
Yaguachi	25,26	52,6	13,29	13,4	3,38	12,6	3,18	0,8	0,2
SUMA	967,3	58,8	568,75	11,87	114,84	13,87	134,2	2,29	22,2

Continuación del cuadro 8

CANTÓN	Metal		Caucho		Madera y residuos de plantas	
	J	K=A*J	L	M=A*L	N	O=A*N
	%	t	%	t	%	t
Alfredo Baquerizo Moreno	1,8	0,14	0,4	0,03	1,6	0,12
Balao	1	0,12	0,2	0,02	2,2	0,27
Balzar	1,2	0,34	0,4	0,11	3,8	1,06
Colimes	1,6	0,05	0,2	0,01	0,8	0,03
Daule Cabecera Cantonal	1	1,09	0,6	0,66	0,8	0,87
Daule La Aurora	0,4	0,11				0
Durán	1,4	1,98	0,2	0,28	3,2	4,53
El Empalme	0,8	0,29	0,2	0,07	0,6	0,22
El Triunfo	2	0,48	0,4	0,1	1,6	0,38
General Elizalde	2	0,17	0,4	0,03	1,6	0,14
Isidro Ayora	1,6	0,11	0,6	0,04	1,2	0,08
Lomas de Sargentillo	1,8	0,22	0,2	0,02	1,4	0,17
Marcelino Maridueña	1,4	0,08	0,2	0,01	0,4	0,02
Milagro	1,8	2,19	0,4	0,49	1	1,22
Naranjal	1,2	0,44	0,8	0,29	2,2	0,8
Naranjito	1,4	0,39	1	0,28	2,2	0,61
Nobol	1	0,12	0,4	0,05	1,2	0,15
Palestina	1,6	0,14	0,6	0,05	1,6	0,14
Playas	1,8	0,72	1,2	0,48	2,4	0,96
Pedro Carbo	1	0,24	0,8	0,19	1,2	0,29
Salitre	1,4	0,11			2,2	0,18
Samborondón Cab. Cant.	1,4	0,27	0,6	0,11	0,6	0,11
Samborondón La Puntilla	2,6	4,98	0,2	0,38	1,5	2,87
Santa Lucía	0,6	0,06	0,4	0,04	4	0,4
Simón Bolívar	0,4	0,08	0,6	0,12	0,8	0,16
Yaguachi	0,8	0,2	0,2	0,05	2,6	0,66
SUMA	1,56	15,12	0,41	3,93	1,7	16,44

Continuación del cuadro 8

CANTÓN	Tierra		Otros (tela, pañales. Cuero)		Total
	P	Q=A*P	R	S=A*T	T
	%	t	%	t	t
Alfredo Baquerizo Moreno	2,2	0,17	11,4	0,87	7,65
Balao	0,8	0,1	4,6	0,56	12,2
Balzar		0	10,2	2,85	27,9
Colimes	0,4	0,01	9,6	0,31	3,24
Daule Cabecera Cantonal	0,6	0,66	10	10,93	109
Daule La Aurora		0	3,2	0,87	27,3
Durán	0,4	0,57	4,4	6,23	142
El Empalme	2	0,72	6	2,17	36,1
El Triunfo	0,6	0,14	19,2	4,62	24,1
General Elizalde	0,6	0,05	19,2	1,64	8,54
Isidro Ayora	0,8	0,05	6,2	0,42	6,77
Lomas de Sargentillo	1,2	0,15	11,2	1,36	12,2
Marcelino Maridueña	0,2	0,01	9	0,51	5,65
Milagro	0,6	0,73	5,8	7,06	122
Naranjal	1	0,37	4,4	1,61	36,5
Naranjito	1,2	0,34	8,2	2,29	27,9
Nobol	1	0,12	7,2	0,88	12,2
Palestina	0,4	0,03	9,4	0,81	8,59
Playas	1,8	0,72	11,4	4,56	40
Pedro Carbo	1	0,24	8,8	2,1	23,9
Salitre	1,2	0,1	10,4	0,84	8,11
Samborondón Cab. Cant.		0	5,8	1,1	18,9
Samborondón La Puntilla	0,2	0,38	12,2	23,36	192
Santa Lucía	0,2	0,02	6,6	0,67	10,1
Simón Bolívar	0,8	0,16	15,2	3,07	20,2
Yaguachi	0,2	0,05	16,8	4,24	25,3
SUMA	0,61	5,89	8,88	85,92	967

Continuación del cuadro 8

CANTÓN	NO RECICLABLE	RECICLABLE	CLASIF. DE RESIDUOS	
	C+Q+0.55	E+G+J+K+M+0.5 5	NO RECICLABLE	RECICLABLE
	t/día	t/día	%	%
Alfredo Baquerizo Moreno	5,25	2,39	69%	31%
Balao	9,99	2,18	82%	18%
Balzar	20,8	7,12	75%	25%
Colimes	2,23	1,01	69%	31%
Daule Cabecera Cantonal	73,03	36,3	67%	33%
Daule La Aurora	14,92	12,41	55%	45%
Durán	99,95	41,62	71%	29%
El Empalme	29,38	6,71	81%	19%
El Triunfo	15,78	8,27	66%	34%
General Elizalde	5,6	2,94	66%	34%
Isidro Ayora	5,31	1,46	79%	21%
Lomas de Sargentillo	8,8	3,36	72%	28%
Marcelino Maridueña	3,99	1,65	71%	29%
Milagro	79,93	41,73	66%	34%
Naranjal	25,79	10,74	71%	29%
Naranjito	20,93	7,01	75%	35%
Nobol	9,18	3	75%	25%
Palestina	6,4	2,19	75%	25%
Playas	24,91	15,07	62%	38%
Pedro Carbo	14,36	9,49	60%	40%
Salitre	5,84	2,27	72%	28%
Samborondón Cab. Cant.	10,55	8,39	56%	44%
Samborondón La Puntilla	102,84	88,67	54%	46%
Santa Lucía	6,77	3,32	67%	33%
Simón Bolívar	15,4	4,81	76%	24%
Yaguachi	16,12	9,14	64%	36%
SUMA	634,04	333,25	66%	34%

Fuente: Consejo Provincial del Guayas (2010)

Del Cuadro 8, se puede rescatar que la composición máxima de residuos putrescibles llega al 76,8% y 6,6% de papel y cartón en un sector de bajos recursos (Balao). El mínimo corresponde a un sector de muy altas condiciones económicas, el cual es el más alto de la provincia en una población muy pequeña (Samborondón, sector La Puntilla). El porcentaje de residuos putrescibles es de 45,9%, y 23,8% de papel y cartón. Esto guarda una relación lógica con ingreso per cápita y composición de la generación de residuos, también justifica por qué en los países de primer mundo la producción de materia orgánica es menor en proporción.

El promedio ponderado de los RSU de los cantones de la provincia del Guayas determina que la composición es muy similar a la de Guayaquil.

Cuadro 9. Caracterización resumen de los residuos sólidos en cantones de la provincia del Guayas con excepción de Guayaquil

Residuos sólidos	%
Orgánicos	58,8
Plásticos	11,87
Cartón y papel	13,87
Vidrio	2,29
Metal	1,56
Caucho	0,41
Madera y residuos de plantas	1,7
Tierra	0,61
Otros (telas, pañales, cuero)	8,88

Fuente: Consejo Provincial del Guayas (2010)

Los tres materiales de mayor proporción en las ciudades cercanas a la ciudad de Guayaquil, en la provincia del Guayas, son los siguientes: orgánicos, cartón y papel y plásticos (Cuadro 9), que constituyen casi el 85% de todos los residuos sólidos, condición que es similar a la de Guayaquil (Cuadro 10).

Cuadro 10. Caracterización de los residuos sólidos en el Relleno Sanitario Las Iguanas de Guayaquil

Residuos	Promedio ponderado
Orgánicos	58,6%
Plásticos línea hogar	0,8%
Plásticos pet	1,2%
Fundas plásticas	11,2%
Envolturas plásticas	1,3%
Papel y cartón	12,3%
Vidrio	2,5%
Metal	0,8%
Caucho	0,4%
Madera y residuos de plantas	1,9%
Piedra	2,0%
Otros (pañales, tela, cuero, etc.)	7,0%

Fuente: Informe de caracterización (Consortio ILM Las Iguanas, 2012)

2.2.3 Masa específica de los residuos

Collazos (2008) expresa, en el Cuadro 11, que la masa específica aproximada de la basura doméstica en sus diferentes etapas puede variar de 0,35 m³/t a 1 m³/t, condición que puede afectar la producción de lixiviados considerando que un relleno sanitario opera en condiciones anaeróbicas. Al tener densidades bajas, existe la presencia de aire entre los residuos y su evolución inicial será aerobia.

Cuadro 11. Masa específica de los residuos domésticos en diferentes etapas

Almacenada dentro de la residencia	0,35 t/m ³
Cuando se entrega a la empresa recolectora	0,40 t/m ³
Dentro del vehículo compactador	0,60 t/m ³
Dentro del vehículo sin compactador	0,40 t/m ³
Al descargarla en el botadero de basura	0,40 t/m ³
En el botadero de basura después de dos meses	0,70 t/m ³
En el botadero de basura después de un año	1 t/m ³

Fuente: Diseño y operación de rellenos sanitarios, Collazos (2011)

2.2.4 Condiciones ambientales de Guayaquil

Las condiciones ambientales de la ciudad de Guayaquil (ver Cuadro 12) corresponden a clima “tropical con invierno seco”, según la clasificación climática de Köppen (Wayback Machine, 2008). Los componentes putrescibles se descomponen de una manera más acelerada que en otras latitudes.

Cuadro 12 Clima en Guayaquil

Temperatura promedio anual*	25.4°C
Temperatura absoluta máxima promedio anual	33.8°C
Temperatura absoluta mínima promedio anual	20.6°C
Promedio anual de precipitación*	1285.6 mm/año
Días de lluvia**	90 días/año
Tasa máxima de lluvia**	172 mm/hora
Humedad máxima anual**	100%
Humedad mínima anual**	52%
Índice máximo UV**	13.5
Radiación solar máxima**	1475 W/m ²

Fuente: * (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2015)

** (Agencia Espacial Civil Ecuatoriana, 2017)

El período de lluvias en Guayaquil es intenso, en total sólo 4 meses al año, el resto del tiempo no existen lluvias.

2.2.5 Producción de lixiviados en el Relleno Sanitario Las Iguanas de Guayaquil

En el relleno sanitario de Guayaquil, ubicado a 14 km del centro de la ciudad, se tienen varios sectores de recepción de residuos (ver Figura 3).



Figura 3 Plano de ubicación del Relleno Sanitario Las Iguanas en la ciudad de Guayaquil. von Buchwald (2011)

En la Figura 3 se aprecia los diferentes sectores de operación del RS Las Iguanas, el sector “A”, que operó inicialmente, su proceso de almacenamiento se dio en celdas diarias en forma de cápsulas, las que nunca se destaparon para integrar con el resto de los residuos, al ser arcilla el material usado para su cobertura, mantenían más tiempo los líquidos almacenados. Sin embargo, producían lixiviados en épocas no lluviosas (von Buchwald, 2005).

Debido a la temperatura ambiental alta en Guayaquil (34^o máxima y 20^o mínima) (INAMHI, 2015), la descomposición de la materia orgánica es casi inmediata. Esto lo demuestra el proceso de maduración de los gases en el RS Las Iguanas, lo cual llega a producir metano con porcentajes mayores al 50% en 9 meses (ver Figura 4).

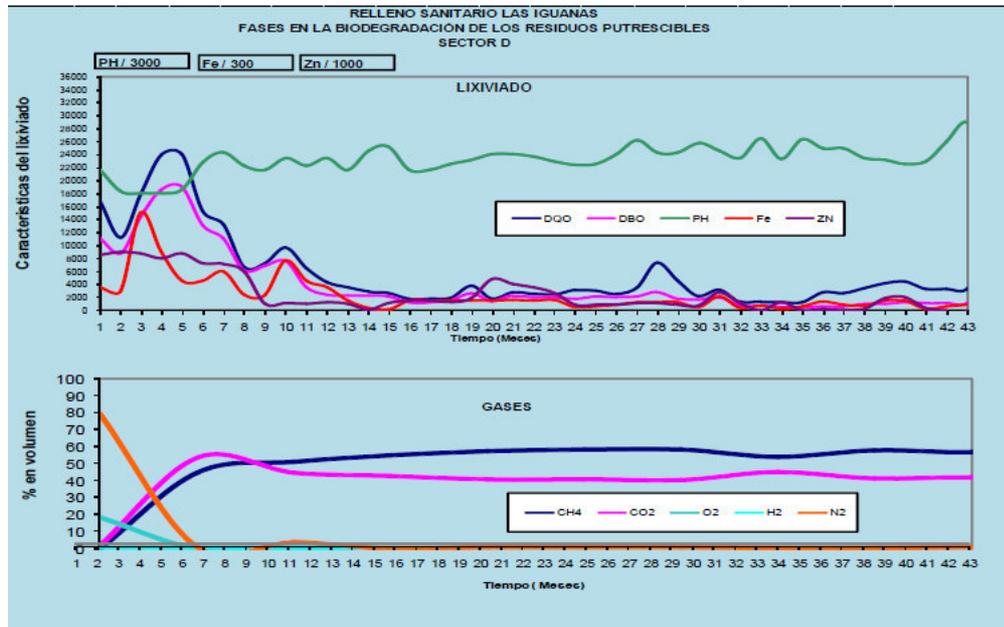


Figura 4 Evolución de la composición de lixiviados y gases en el RS Las Iguanas. von Buchwald (2011)

De precipitarse, la evolución de las concentraciones de lixiviados en DBO, DQO y metales pesados se da cuando el porcentaje del metano es mayoritario, condición que solo ocurre con este tipo de clima y con alto contenido de materia orgánica.

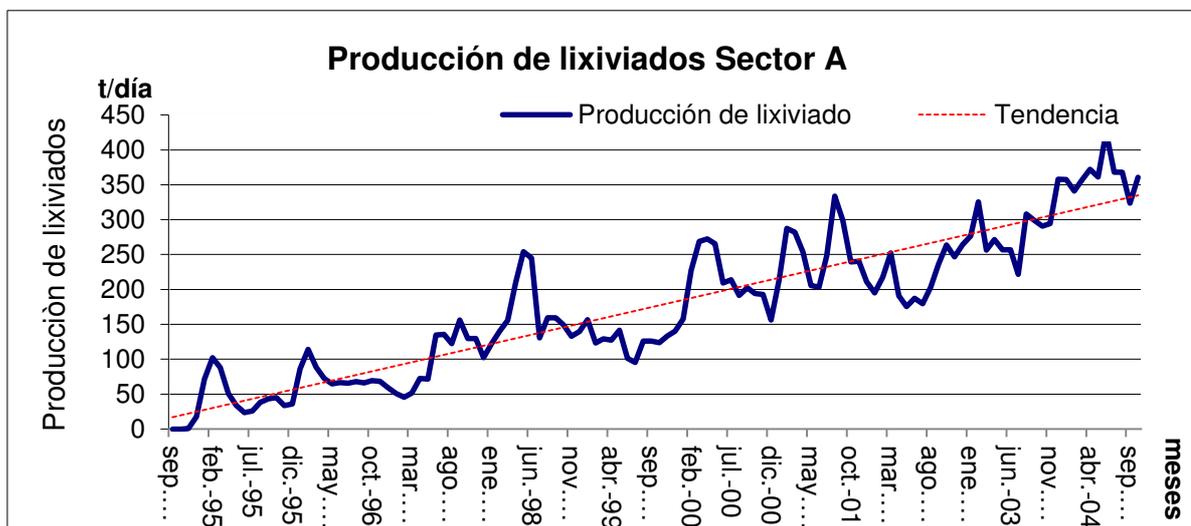


Figura 5. Producción de lixiviados durante la operación Sector A del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)

En la Figura 5, se aprecia la producción mensual de lixiviados, la que mantiene una tendencia progresiva y se incrementa en el periodo de lluvias, pero no se elimina en el periodo seco. En Guayaquil, los periodos de lluvias son bien

definidos, desde finales de diciembre hasta finales de abril, el resto del tiempo es seco, es importante destacar que la recepción de residuos diarios en el relleno también se incrementó con tendencias entre el 4 y el 10 % anual, es por esto que la curva de producción de lixiviados también se incrementa contrario lo expresado por CORENOSTÓS (Collazos, 2011) el que asegura que la producción cae en 5 años.

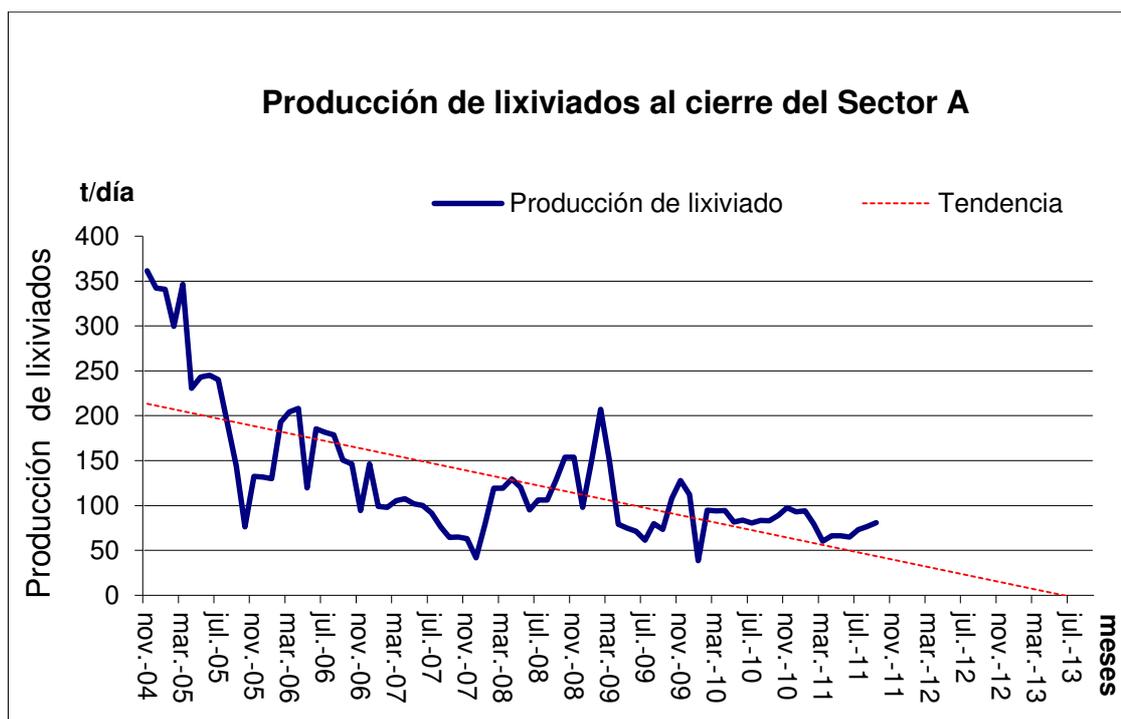


Figura 6. Producción de lixiviados etapa de cierre Sector A del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)

El sector “A” terminó su operación en el año 2004 y la tendencia de producción de lixiviados es a la baja (Figura 6) con un decrecimiento significativo en los primeros meses, manteniendo ciertos picos en la época de lluvias. Queda claro, sin embargo, que las lluvias no son el único elemento que afecta la producción de lixiviados, como lo aseveran los investigadores que se basan en RSU de los países de Europa y los Estados Unidos.

En el sector “C”, se recibió RSU hasta el año 2006 (Figura 7). En este sector, se cimentó también sobre una capa de arcilla, se usaron celdas “tipo” de RS encapsuladas, aunque el material con el que se cubrían fue más limoso y permeable. Estas capas tampoco se descubrieron para recibir las capas

superiores y el crecimiento de producción de lixiviados guarda una relación con el incremento de los residuos depositados en el relleno sanitario.

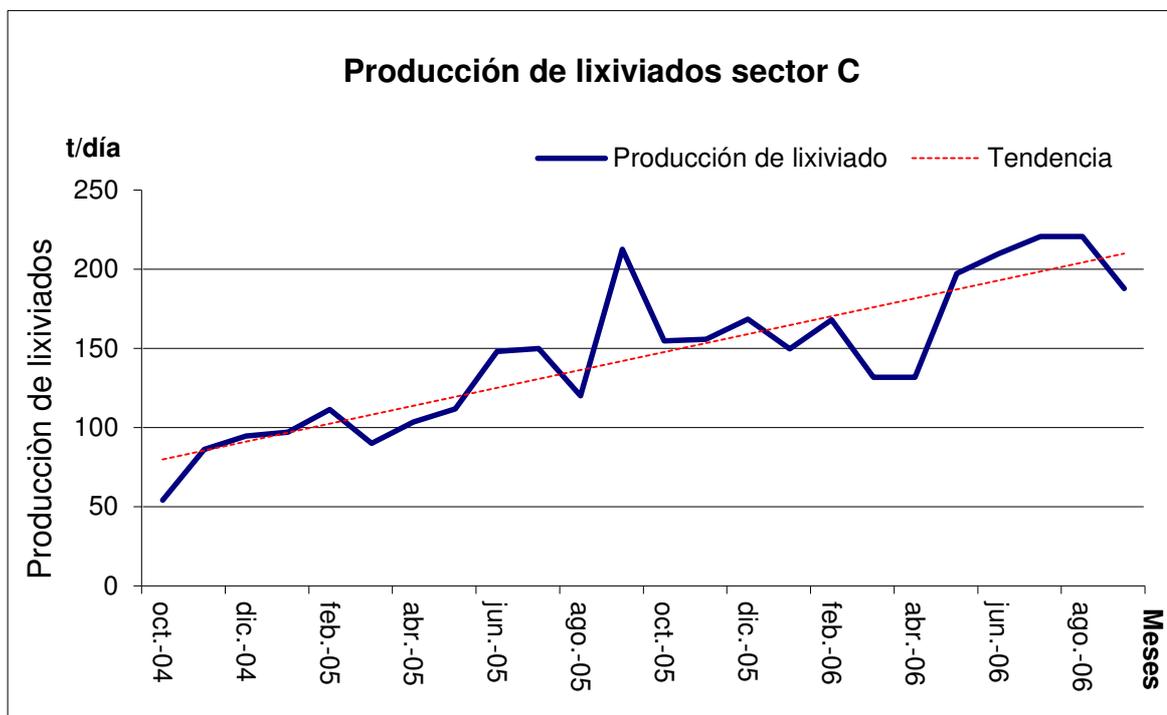


Figura 7. Producción de lixiviados durante la operación Sector C del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaqui: von Buchwald (2009)

En el sector C (Figura 8), también se aprecia un crecimiento de la producción mensual de lixiviados con sus variaciones, pero nunca se reduce al mínimo en épocas secas, como es el caso de rellenos con diferentes composiciones de RSU. En este caso, también se tiene que considerar que los ingresos de los residuos al relleno se incrementaron mensualmente.



Figura 8. **Producción de lixiviados, etapa de cierre Sector C del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil.** von Buchwald (2009)

La producción de lixiviados en el sector C, cuando dejó de recibir RSU (Figura 8), también fue decreciente, aunque hubo un incremento puntual en la época de lluvias, pero su tendencia fue reducir su producción.

2.2.6 Influencia de las aguas lluvia en el relleno sanitario de Guayaquil

En el relleno sanitario de Guayaquil, se tiene registro de las intensidades de lluvias y su repercusión sobre los volúmenes de producción de lixiviados. En la Figura 9, se aprecia la influencia en la producción de lixiviados en su etapa final de recepción de residuos y la influencia en su etapa que no recibe residuos, pero produce lixiviados.

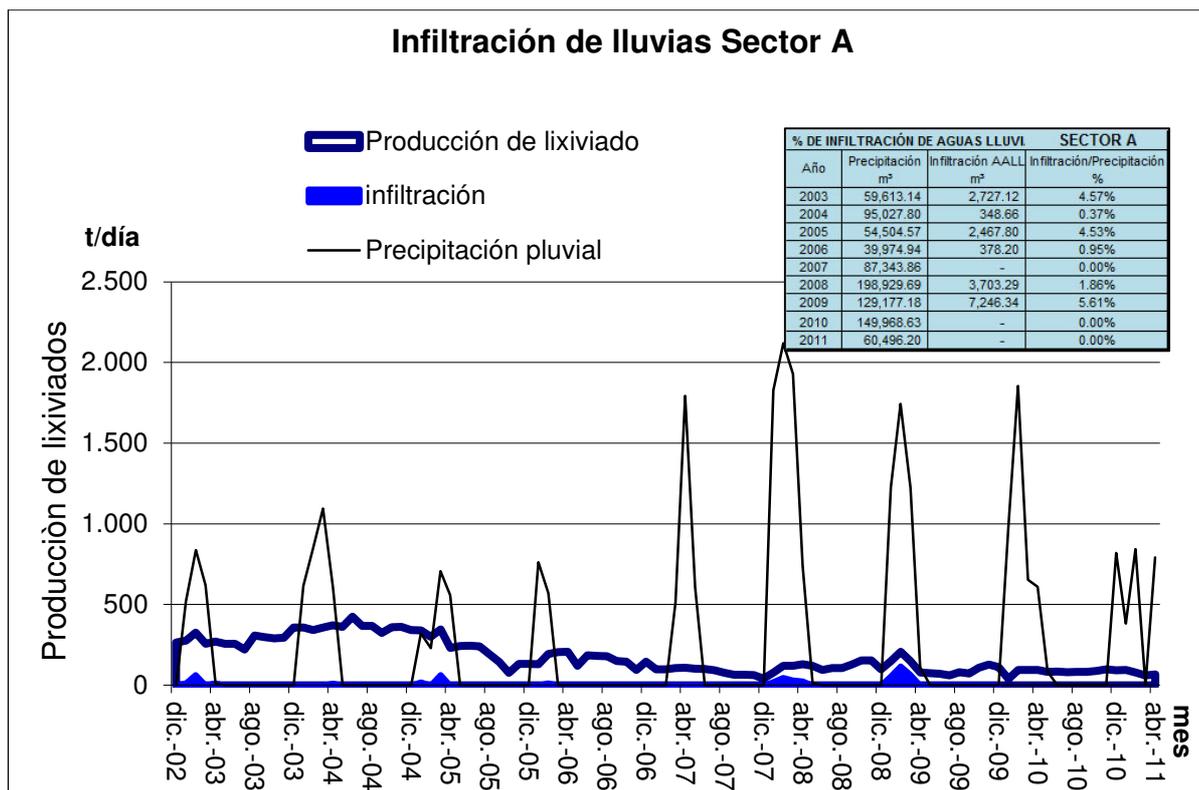


Figura 9. Infiltración de aguas lluvia sector A del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)

En el sector A (Figura 9) fácilmente se puede apreciar cómo incide en la producción de lixiviados un relleno que terminó su operación. Es muy puntual la influencia mientras el relleno sigue su tendencia de reducir su producción de lixiviados.

En el sector C, operativo desde el 2004 hasta fines del 2006 (Figura 10), se puede apreciar el crecimiento de la producción de los lixiviados y su influencia en el periodo de lluvias cuando estaba en operación e, igualmente, cuando terminó su operación, hasta el año 2011.

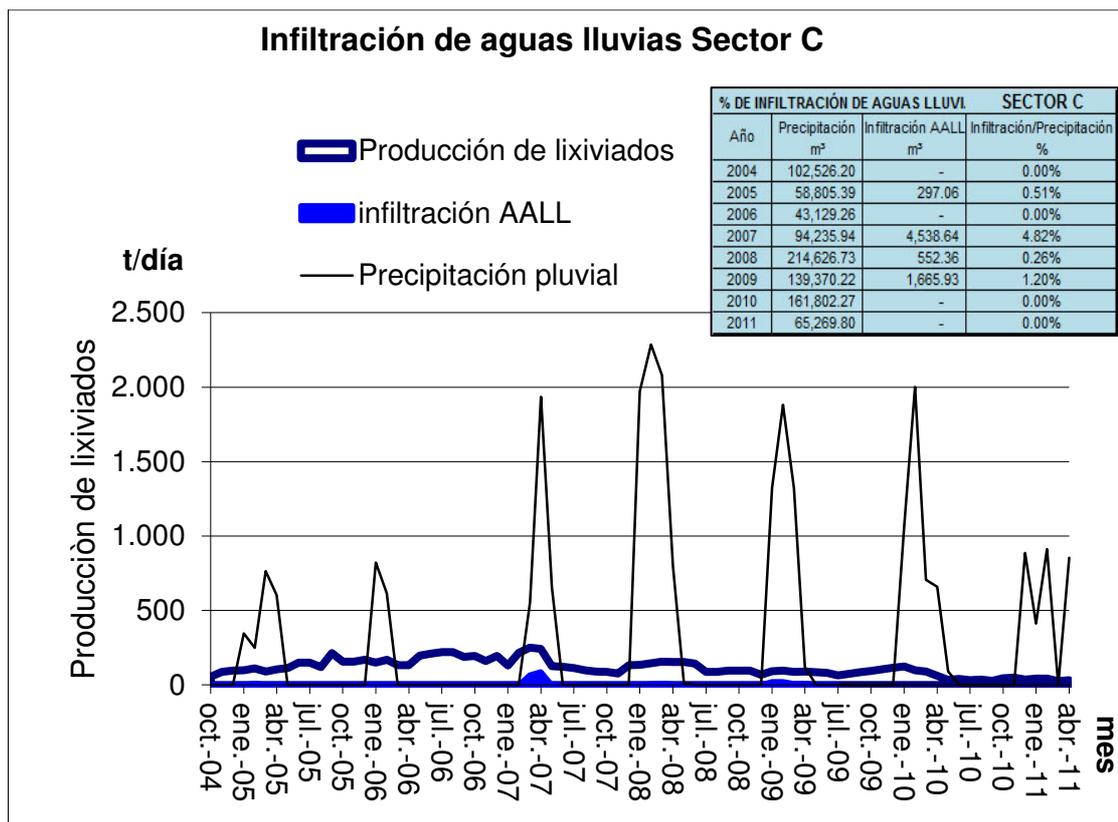


Figura 10. Infiltración de aguas lluvias sector C del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)

En los sectores A y C se usaron fondos de arcilla y drenajes triangulares en forma de espina de pescado para captar lixiviados con celdas de 4,4 m de altura y capas de cobertura de 60 cm, las cuales no se abrían para recibir nuevos residuos, se diferencian principalmente en que un sector se usó material más arcilloso y en el otro, uno más limoso; el sector D tiene un fondo también con arcilla impermeable, pero tiene una capa de 60 cm de piedra para que actúe como filtro en toda el área de fondo para que fluyan los lixiviados hasta su punto de colección. Las celdas son de dimensiones similares, pero, para implantar una nueva celda sobre la existente, se elimina la cobertura anterior para que los lixiviados de las celdas nuevas no se encapsulen y fluyan directamente a la capa inferior de piedra. La producción de lixiviados en el sector D es mayor en proporción que con los sectores A y C por su diseño de operación (von Buchwald, 1999). La influencia de las aguas lluvia se refleja en las producciones de lixiviados con incrementos mayores a las tendencias. En la Figura 11, se aprecia que el inicio de la producción de lixiviados se dio

antes de las lluvias y que estas hacen que se produzcan incrementos puntuales y luego mantienen la misma tendencia, la que se evidencia cuando las lluvias no son significativas.

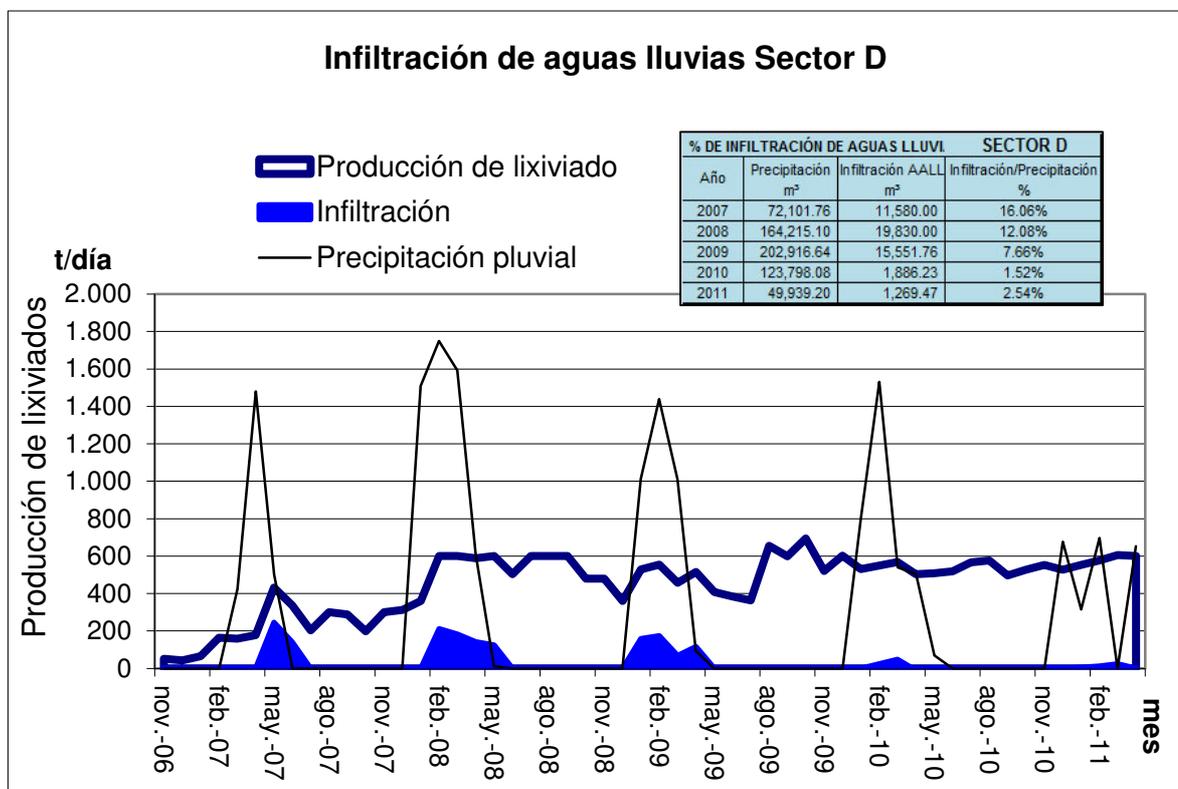


Figura 11. Infiltración de aguas lluvias sector D del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)

En la Figura 11, se aprecia cómo afectan las lluvias los incrementos de los lixiviados con un desfase de dos meses, patrón que se mantiene en la mayoría de los casos. Ocasionalmente, también sucede que cuando se trabaja muy próximo a las celdas más cercanas a la descarga de los lixiviados, se incrementa la producción y se obtienen resultados que pueden confundir las tendencias.

2.2.7 Métodos de cálculo de producción de lixiviados (considerando influencias de lluvias) aplicados a los sectores del relleno sanitario de Guayaquil

Los métodos más recomendados para determinar la producción de lixiviados son el suizo (Orth, 1981), el de Eva Röben (Röben, 2002) y el de Corenostós (Collazos, 2011). Se corrieron estos métodos en todos los sectores del relleno sanitario de Guayaquil, pero ninguno se ajustó a los registros reales de los sectores. Al aplicar los métodos en sectores que se cerraron, se aprecia que los métodos de Eva Röben y el método suizo consideran que la producción se mantiene indefinida, cuando en el sector A, que está cerrado (Figura 12), la producción disminuye progresivamente y el método Corenostós presenta valores muy superiores en el periodo de producción activa, aunque la curva después del cierre es muy similar.

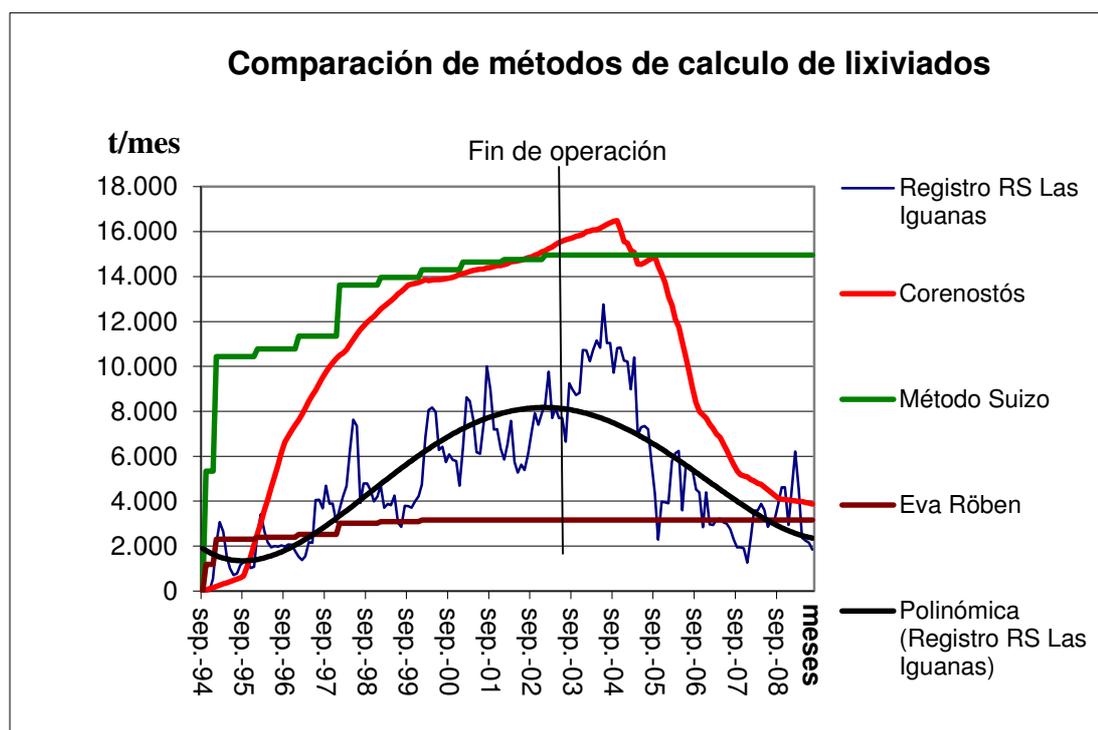


Figura 12. Comparación métodos de cálculo de lixiviados sectores A del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)

En el sector C (Figura 13), los resultados tampoco se ajustaron. El método de Corenostós inicialmente se ajustó, pero se disparó hasta que se cerró ese sector. Los métodos de Röben y suizo no se ajustan; mantienen los mismos

resultados que el caso anterior considerando que los volúmenes se mantendrán constantes luego del cierre del sector.

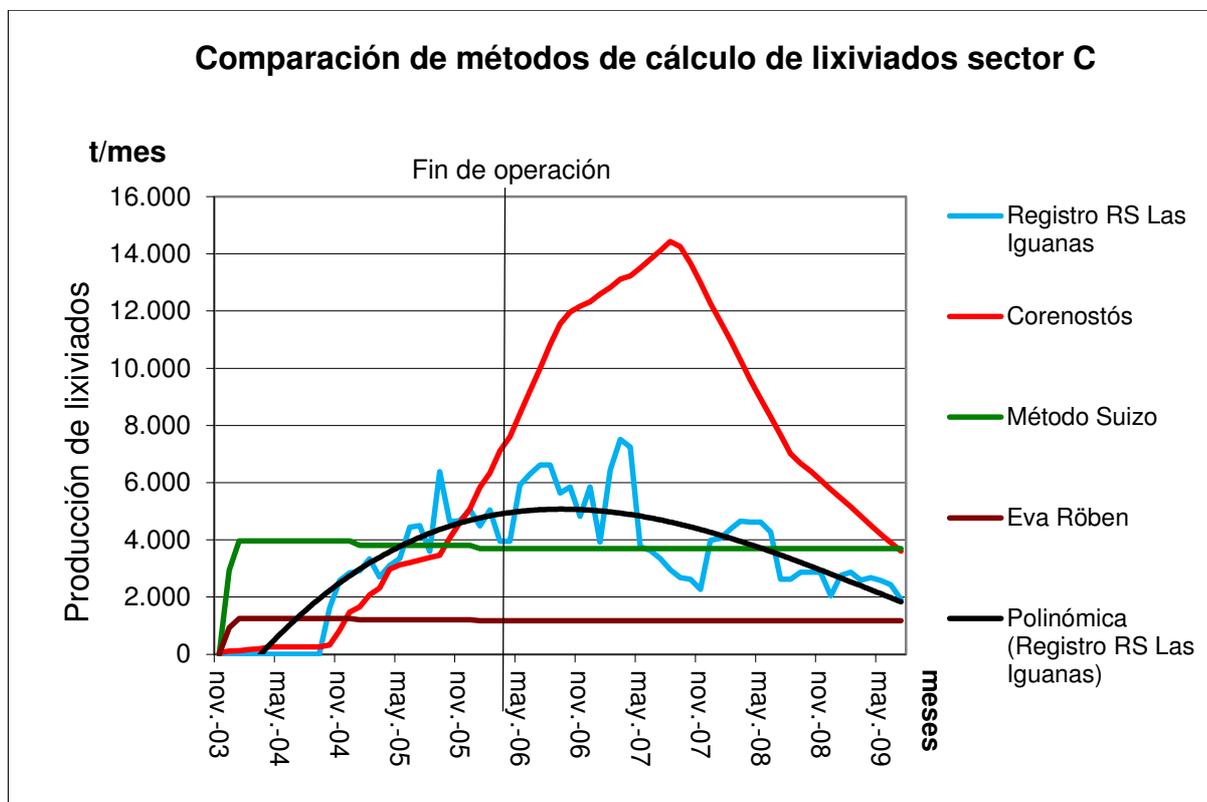


Figura 13. Comparación métodos de cálculo de lixiviados sector C del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)

En el caso del sector D (Figura 14), que continúa en operación, existe mayor producción de lixiviados. Esto se debe al sistema de operación; las curvas de producción de los diferentes métodos no alcanzan las producciones generadas en el sector.

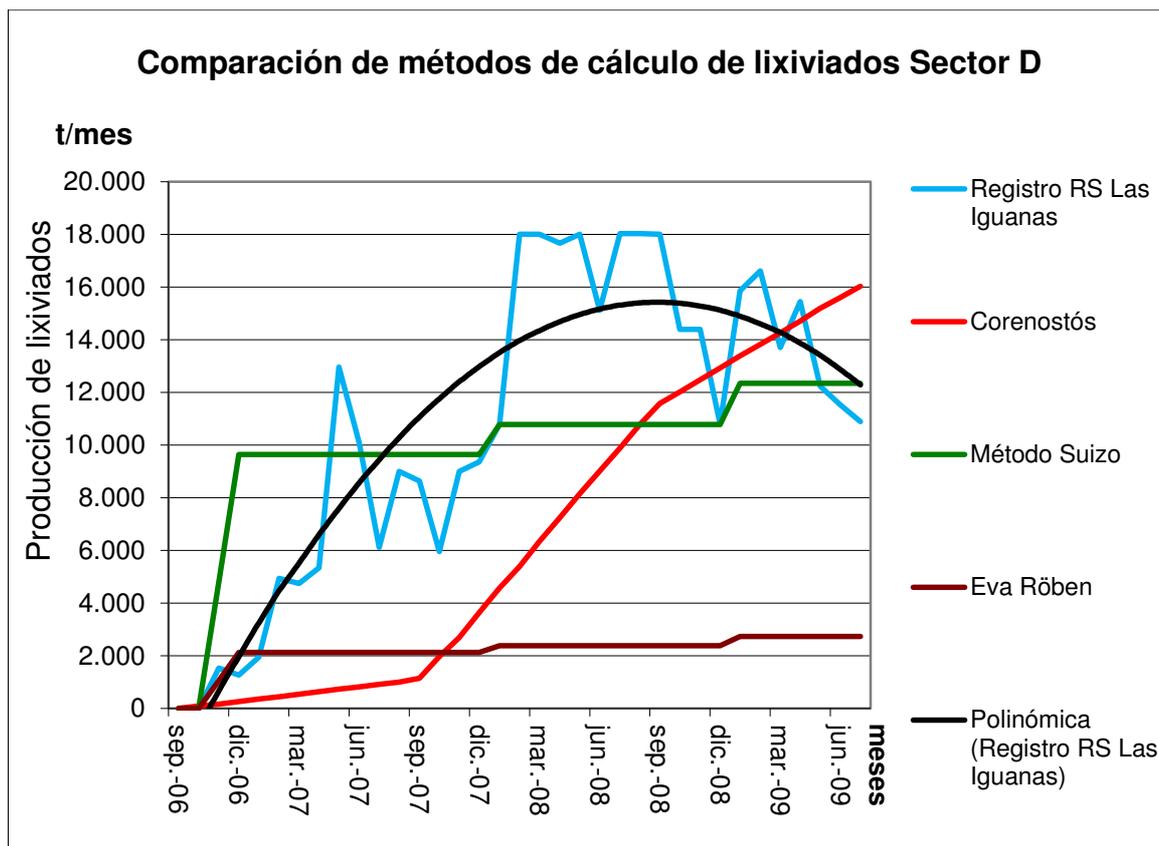


Figura 14. Comparación métodos de cálculo de lixiviados sector D del Relleno Sanitario Las Iguanas-Guayaquil. von Buchwald (2009)

2.2.8 Clasificación de los RSU en función de las condiciones económicas

Basado en la experiencia planteada por Sandra Cointreau (1982) en la que establece una relación de diferencias en composición de los componentes de los RSU en función de su condición económica, en el relleno sanitario de Guayaquil, el operador del relleno el Consorcio ILM desarrolló una investigación de las características de los RSU en función de las condiciones económicas, se analizaron los recorridos de los recolectores y se los clasificó por la condición económica del sector atendido (ver Cuadro 13). Con la clasificación de cada sector, se establecieron cinco grupos económicos. Para obtener una muestra representativa se usaron los métodos recomendados por CEPIS.

Cuadro 13. Producción de residuos sólidos domiciliarios por sector económico en Guayaquil

SUB-ZONA	SECTOR	ESTRATO SOCIOECONOMICO		
		INGRESO POR HOGAR	ESTRATO	
6B	Calle 29	\$ 446.70	MEDIO	MEDIO
7B	BATALLON	\$ 290.50	MEDIO BAJO	MEDIO BAJO
5B	CISNE II	\$ 290.50	MEDIO BAJO	MEDIO BAJO
16 A	TRINITARIA	\$ 132.80	BAJO	BAJO
17 A	FERTISA	\$ 290.50	MEDIO BAJO	MEDIO BAJO
19A	GUASMO	\$ 290.50	MEDIO BAJO	MEDIO BAJO
18A	PRADERA	\$ 722.20	MEDIO ALTO	MEDIO ALTO
14A	AYACUCHO	\$ 1,945.70	ALTO	MEDIO ALTO
	GARCIA MORENO	\$ 446.70	MEDIO	
	ESTEROS	\$ 722.20	MEDIO ALTO	
15A	LETAMENDI	\$ 446.70	MEDIO	MEDIO
3A-3B	URDANETA	\$ 722.20	MEDIO ALTO	MEDIO ALTO
4B	FEBRES CORDERO/CARAGUAY	\$ 446.70	MEDIO	MEDIO
2B	9 DE OCTUBRE	\$ 722.20	MEDIO ALTO	MEDIO ALTO
1A-2A	ROCAFUERTE	\$ 722.20	MEDIO ALTO	MEDIO ALTO
11 B	SAN EDUARDO	\$ 722.20	MEDIO ALTO	ALTO
	CEIBOS	\$ 1,945.70	ALTO	
8B	URDESA	\$ 1,945.70	ALTO	ALTO
8A	AEROPUERTO	\$ 1,945.70	ALTO	ALTO
10B	MAPASINGUE	\$ 446.70	MEDIO	MEDIO
10A	MARTHA DE ROLDOS	\$ 722.20	MEDIO ALTO	MEDIO ALTO
13A	KM 8 Y MEDIO	\$ 290.50	MEDIO BAJO	MEDIO BAJO
	PROSPERINA	\$ 290.50	MEDIO BAJO	
9A	ALBORADA	\$ 722.20	MEDIO ALTO	MEDIO ALTO
12 B	BALERIO ESTACIO	\$ 446.70	MEDIO	BAJO
	NUEVA PROSPERINA	\$ 290.50	MEDIO BAJO	
	FORTIN	\$ 132.80	BAJO	
	FLOR DE BASTION	\$ 132.80	BAJO	
	GERMANIA	\$ 446.70	MEDIO	
	INMACONSA	\$ 290.50	MEDIO BAJO	
12A	BASTION	\$ 132.80	BAJO	BAJO
	PASCUALES	\$ 132.80	BAJO	
	VERGELES	\$ 446.70	MEDIO	

Fuente: Consorcio ILM Las Iguanas Relleno Sanitario de Guayaquil (2016)
 Bajo<\$150, medio bajo \$151 - \$300, medio \$301 - \$ 500, medio alto \$501 - \$800, alto>\$801

En el Cuadro 13, se ven claramente los diferentes ingresos mensuales familiares de los hogares. Los menores, de 150 dólares, son considerados como bajos y los de más de 1000 dólares son considerados altos.

2.2.9 Tamaño de la muestra

Para elegir la forma de las muestras, se escogió las aleatorias sobre las no aleatorias, ya que los componentes fueron elegidos usando algún criterio

probabilístico y estos brindan una mayor confianza. (Toma & Rubio, 2015, p. 15).

Mediante el uso de muestras aleatorias, se aplicó el método de inferencia estadística, con lo cual se llevó a cabo un proceso de estimación de parámetros (media y varianza) y prueba de hipótesis para buscar conclusiones que brinden un adecuado sustento científico. La planificación de una investigación científica usualmente tiene como propósito verificar si las hipótesis o supuestos que se tienen sobre la población en estudio se pueden aceptar como válidos o se deben considerar como falsos (Toma & Rubio, 2014, p. 111).

El procedimiento que usó el Consorcio ILM (en el Relleno Sanitario Las Iguanas) fue el recomendado por CEPIS HDT N° 97 de junio de 2005 (CEPIS, 2005). Este es universalmente aceptado para el muestreo de residuos; en este caso, el tamaño de muestra correspondía a 63 recolectores repartidos por sectores económicos. Sin embargo, se analizaron 65 muestras: 14 recolectores para el sector BAJO, 15 para el sector MEDIO BAJO, 16 para el sector MEDIO, 10 para el sector MEDIO ALTO y 10 para el sector ALTO.

Cuadro 14. Cálculo del tamaño de la muestra

Estrato socioeconómico	Ri	Wi	xi = Wi/Ri	(xi-μ) ²	% de cada estrato	# muestras diarias	muestras totales
	promedio viajes/día	promedio toneladas/día					
BAJO	55	560,7	10,19	94,3	19	1,69	12
MEDIO BAJO	48	702,7	14,64	200,39	24	2,12	15
MEDIO	19	764,1	40,22	1.578,65	26	2,31	16
MEDIO ALTO	30	484,4	16,15	245,33	16	1,46	10
ALTO	40	466,2	11,66	124,8	16	1,41	10
Suma	192	2.978,10	92,85	2.243,47		9	63
Media de la población	μ =	Σxi / ΣRi		0,48			
Número de viajes	N =	ΣRi		192			
Varianza de la población	σ ² =	1/N SUMA(xi-μ) ²		11,68			
	α =			5%			
NIVEL DE CONFIANZA	1-α/2 =			0,98			
fx DISTR.NORM.ESTAND.INV	Z _{1-α/2} =			1,96			
Promedio	ΣWi / ΣRi			15,5			
	=						
ERROR ADMISIBLE 10% del promedio	E =	0,10 * (ΣWi / Σri)		1,6			
TAMAÑO DE LA MUESTRA	n =	[Z ² _{1-α/2} * ΣRi * σ ²] / [(ΣRi-1) * E ² + (Z ² _{1-α/2} * σ ²)] =		8,76	SE ASUME		9

Fuente: Consorcio ILM Las Iguanas Relleno Sanitario de Guayaquil (2016)

Con este análisis, se determinó el producto (de residuos) per cápita (PPC) de cada sector socioeconómico y se logró identificar que en el sector con condiciones económicas bajas se producen 0.87 kg de residuos urbanos por habitante por día, mientras que en el medio bajo, medio, medio alto y alto fueron los siguientes: 0.96, 0.98, 1.27 y 1.56 respectivamente (Cuadro 15). La subzona 10 B no fue considerada para el cálculo del promedio del PPC para el estrato socioeconómico medio, debido a que esta zona corresponde a Mapasingue y gran parte de los residuos de esta zona se los clasifica como industriales. Las subzonas 1A, 2A y 2B tampoco fueron consideradas para el promedio del PPC del estrato socioeconómico medio alto, ya que estos sectores tienen influencia comercial además de domiciliaria, por lo que considerar estos sectores distorsionaría los resultados. Se obtuvo, como promedio ponderado, 1.08 kilos por persona por día de residuos urbanos domésticos.

Cuadro 15. Producción de residuos per cápita por estrato socioeconómico de la ciudad de Guayaquil (2016)

Estrato socio económico	SUB-ZONA	Número de días	Toneladas durante 4 meses	Promedio toneladas/día	Población (hab)	Población por estrato socio económico (%)	PPC (Kg/hab /día)	Promedio PPC por estrato socio económico
BAJO	16 A	121	17,212.20	142.25	174,630.50	28%	0.81	0.87
	12 B	121	31,811.62	262.91	296,444.50		0.89	
	12 A	121	18,855.79	155.83	171,974.00		0.91	
MEDIO BAJO	7 B	121	10,471.75	86.54	100,015.50	27%	0.87	0.96
	5 B	121	10,879.82	89.92	94,054.50		0.96	
	17 A	121	18,027.50	148.99	133,905.50		1.11	
	19 A	121	10,233.82	84.58	107,099.50		0.79	
	13 A	121	23,564.39	194.75	184,177.00		1.06	
MEDIO	6 B	121	10,442.15	86.30	94,142.00	14%	0.92	0.98
	15 A	121	10,235.60	84.59	90,629.50		0.93	
	4 B	121	7,494.39	61.94	56,182.00		1.10	
	10 B ¹	121	5,638.42	46.60	72,198.00		0.65 ¹	
MEDIO ALTO	18 A	121	12,287.64	101.55	85,410.00	15%	1.19	1.27
	3 A	121	3,452.77	28.54	20,252.00		1.41	
	3 B	121	5,948.10	49.16	37,150.50		1.32	
	2 B ²	121	8,815.31	72.85	29,867.50		2.442	
	1 A ²	121	11,791.33	97.45	31,872.00		3.062	
	2 A ²	121	3,162.51	26.14	6,989.00		3.742	
	10 A	121	3,008.84	24.87	17,820.00		1.40	
	9 A	121	13,507.11	111.63	106,463.00		1.05	
ALTO	14 A	121	9,172.62	75.81	5,8071.00	16%	1.31	1.56
	11 B	121	25,329.11	209.33	227,783.00		0.92	
	8 B	121	13,932.16	115.14	42,960.50		2.68	
	8 A	121	6,260.31	51.74	38,582.00		1.34	
Población Total:					2'278.673,00			

¹: Gran parte del volumen de basura del sector de Mapasingue está incorporado como industrial

²: Zonas combinadas comercial + domiciliarios

NOTA 1: los sectores medio y medio alto tienen subzonas que están afectadas por áreas comerciales e industriales, por lo que la relación PPC de estos no fue considerada para el promedio por sectores socio económicos.

NOTA 2: En la población total (2'278,673 hab.), no se ha considerado la población flotante.

NOTA 3: El promedio ponderado de PPC es 1.08kg/hab/día.

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos , 2010) , Relleno Sanitario ILM Las Iguanas (2016).

Con los resultados anteriores se puede establecer que las composiciones de los RSU y los porcentajes de materia orgánica no tienen una relación directa con las condiciones económica de cada ciudad, sino con las costumbres alimenticias de cada sector, es por esto que la composición de los RSU de las ciudades cercanas a Guayaquil es muy similar, circunstancia que no es la misma en el resto de las ciudades del país, tal como lo expresa Gutiérrez

(2015) en relación al consumo de carbohidratos, “en la región Sierra se come papa; en la Amazonía, yuca y en la Costa, verde (plátano verde)”.

2.3 Marco legal

2.3.1 Disposiciones legales en Ecuador

Se presentan disposiciones del acuerdo no. 061 (reforma del libro vi del texto unificado de legislación secundaria medio ambiente (Ministerio del Ambiente, 2015) sección i (gestión integral de residuos y/o residuos sólidos no peligrosos) capítulo vi (gestión integral de residuos sólidos no peligrosos, y residuos peligrosos y/o especiales se presentan las siguientes disposiciones):

Responsabilidades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. - entre las responsabilidades que constan en el artículo 57 se encuentran las siguientes:

Elaborar ordenanzas para el manejo de residuos y/o residuos sólidos, (literal e) las mismas que deberán ser concordantes con la política y normativa ambiental nacional, para la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos, y de los residuos que comprende la prevención, control y sanción de actividades que afecten al mismo (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

Garantizar una adecuada disposición final de los residuos y/o residuos generados en el área de su competencia, (literal j) en sitios con condiciones técnicamente adecuadas y que cuenten con la viabilidad técnica otorgada por la Autoridad Ambiental competente. Únicamente se dispondrán los residuos sólidos no peligrosos, cuando su tratamiento, aprovechamiento o minimización no sea factible. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

Determinar en sus Planes de Ordenamiento Territorial los sitios previstos para disposición final de residuos y/o residuos no peligrosos, así como los sitios para acopio y/o transferencia de ser el caso (literal k) (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

Fases de manejo de residuos y/o residuos sólidos no peligrosos.- El artículo 59 presenta que el manejo de los residuos sólidos corresponde al conjunto de actividades técnicas y operativas de la gestión integral de residuos y/o residuos sólidos no peligrosos que incluyen minimización en la generación, separación en la fuente, almacenamiento, recolección, transporte, acopio y/o transferencia, aprovechamiento, tratamiento y disposición final. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

De este artículo, en el párrafo viii (de la disposición final) se presentan los siguientes artículos:

De la disposición final.- Consta en el artículo 75 y es la acción de depósito permanente de los residuos sólidos no peligrosos en rellenos sanitarios u otra alternativa técnica aprobada por la Autoridad Ambiental Nacional; estos deberán cumplir con condiciones técnicas de diseño de construcción y operación. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

La selección del sitio para la disposición final se realizará sobre la base de un estudio técnico de alternativas que deberá ser aprobado por parte de la Autoridad Ambiental, en concordancia con la normativa emitida para el efecto. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

Los rellenos sanitarios u otra alternativa técnica como disposición final deberán cumplir lo establecido en la norma técnica emitida por la Autoridad Ambiental Nacional, de tal manera que se minimicen el impacto ambiental y los riesgos a la salud. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

Los Gobiernos Autónomos Descentralizados podrán proponer tecnologías apropiadas para disposición final de residuos y/o residuos sólidos no peligrosos, para así reducir el volumen de la disposición final de los mismos, enmarcadas en lo establecido en la normativa ambiental nacional. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

Los sistemas de eliminación y disposición final serán aprobados por la Autoridad Ambiental Nacional. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015)

Se dispone lo siguiente en las normas generales para descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce (numeral 5.2.4) contenido en el anexo 1 del libro VI del texto unificado de legislación secundaria medio ambiente, norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua: Los lixiviados generados en los rellenos sanitarios cumplirán con las normas fijadas considerando el criterio de calidad de acuerdo al uso del cuerpo receptor (numeral 5.2.4.7).

Adicionalmente, los límites máximos permisibles para descarga de estos lixiviados a cuerpos de agua, se regirán conforme a la normativa ambiental emitida para el efecto, descrito en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sust. solubles en hexano	mg/l	30,0
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro Total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻²	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Ext. carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10,0
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	50,0
Compuestos Organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Compuestos Organofosforados	Organofosforados totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1 600
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	1000
Sulfuros	S ⁻²	mg/l	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ± 3
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0

¹ La apreciación del color se estima sobre 10 cm de muestra diluida

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2015)

Se dispone lo siguiente en la prevención de la contaminación al recurso suelo (numeral 4.2) del anexo 2 del libro vi del texto unificado de legislación secundaria medio ambiente: norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados:

“La prevención de la contaminación del recurso suelo se fundamenta en las buenas prácticas de manejo e ingeniería aplicadas a cada uno de los procesos productivos. Se evitará trasladar el problema de contaminación de los recursos agua y aire hacia el recurso suelo o viceversa”.

“Toda actividad productiva que genere residuos sólidos no peligrosos debe implementar una política de reciclaje o reúso de los mismos. Si el reciclaje o reúso no es viable, los residuos deberán ser dispuestos de manera ambientalmente aceptable.”

“Las industrias y proveedores de servicios deben llevar un registro de los residuos generados, lo cual incluye la indicación del volumen y sitio de disposición de los mismos. Por ningún motivo se deberá disponer los residuos en áreas no aprobadas para el efecto por parte de la entidad ambiental de control”

2.3.2 Disposiciones legales en Perú

De acuerdo a DECRETO LEGISLATIVO N° 1278, **Ley General de Residuos Sólidos** el Título IV (Gestión Ambiental de residuos Sólidos) CAPÍTULO III (Autoridades Municipales) describe el artículo 23:

Municipalidades provinciales:

Planificar y aprobar la gestión integral de los residuos sólidos en el ámbito de su jurisdicción, a través de los Planes Provinciales de Gestión Integral de Residuos Sólidos, (PIGARS) los cuales deben identificar los espacios geográficos para la ubicación de las infraestructuras de residuos, compatibilizando los planes de manejo de residuos sólidos con las políticas de desarrollo local y regional... (Ministerio del Ambiente de Perú, 2017)

Manejo de residuos sólidos, (Título I) en el capítulo 2: disposiciones generales para el manejo, artículos 13 y 14:

Lineamientos de la Gestión Integral de Residuos Sólidos

El manejo de residuos sólidos realizado por toda persona natural o jurídica deberá ser sanitaria y ambientalmente adecuado, con sujeción a los principios de prevención de impactos negativos y protección de la salud, así como a los lineamientos de política establecidos en el Artículo 6. (Ministerio del Ambiente de Perú, 2017)

Definición de residuos sólidos

Son residuos sólidos aquellas sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido de los que su generador dispone, o está obligado a disponer, en virtud de lo establecido en la normatividad nacional o de los riesgos que causan a la salud y el ambiente, para ser manejados a través de un sistema que incluya, según corresponda, las siguientes operaciones o procesos: minimización de residuos, segregación en la fuente, reaprovechamiento, almacenamiento, recolección, comercialización, transporte, tratamiento, transferencia y disposición final.

Esta definición incluye a los residuos generados por eventos naturales.

Para los efectos de esta Ley y sus reglamentos, (literal 15.1) los residuos sólidos se clasifican según su origen: residuo domiciliario, residuo comercial, residuo de limpieza de espacios públicos, residuo de establecimiento de atención de salud, residuo industrial, residuo de las actividades de construcción, residuo agropecuario y residuo de instalaciones o actividades especiales.

Medidas de seguridad y sanciones se presenta el artículo 48 Sanciones:(Título VIII)

Sin perjuicio de las acciones constitucionales, civiles o penales a que hubiere lugar, las infracciones a las disposiciones contenidas en la presente Ley y sus correspondientes reglamentaciones darán lugar a la aplicación de las sanciones previstas en el Capítulo XX del Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, así como en las normas sectoriales y municipales vigentes.

De acuerdo al decreto supremo N° 057-2004-PCM de la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos, (julio del 2004) en el Título III (Manejo de Residuos Sólidos) capítulo I (Aspectos Generales), se presenta:

Responsabilidad por daños dice (Artículo 14)

Toda EPS-RS (Empresas prestadoras de servicios de residuos sólidos), EC-RS (Empresas comercializadoras de residuos sólidos) y las municipalidades que presten directamente los servicios de residuos sólidos que hagan uso o manejo indebido de los residuos son responsables de los daños y perjuicios que ocasionen dichas acciones a la salud, al ambiente o a terceros. (Ministerio del Ambiente de Perú, 2017)

Responsabilidad, incentivos, infracciones y sanciones, en el capítulo I: Responsabilidad:(Título X)**Responsabilidad por manejo de residuos presentado en el artículo 140:**

El manejo de los residuos deberá tener un titular responsable. Esta condición corresponderá al generador o a la EPS-RS, la municipalidad provincial o distrital, o la EC-RS, según cada caso.

Quedan exentos de responsabilidad los generadores de residuos por los daños que pueda ocasionar el manejo inadecuado de estos siempre que los hayan entregado a los responsables del manejo de residuos sólidos observando las respectivas normas sanitarias y ambientales. (Ministerio del Ambiente de Perú, 2017)

2.4 Bases teóricas

En el siglo XVIII, Antoine Lavoisier demostró el principio del concepto de que la materia no se crea ni se destruye, solo se transforma, los elementos biodegradables o putrescibles se transforman en líquidos y gases, aunque no todos los componentes de origen orgánico son de rápida descomposición.

La proporción de los componentes orgánicos putrescibles de los RSU durante el año son heterogéneos, debido a la estacionalidad de su producción, esta condición se refleja en las ciudades cercanas a Guayaquil.

Las proporciones de la materia orgánica putrescible en los RSU generalmente está relacionada con el nivel económico de la población (Sandra

Cointreau,1982) en una forma inversamente proporcional, los pueblos con mayor poder adquisitivo tienen menor proporción de MOP y viceversa. Alrededor del 80% de la población mundial tiene bajo recursos de económicos, y generalmente está asentada en regiones de bajas o mínimas lluvias, su generación de lixiviados no está controlada y consecuentemente contamina los acuíferos.

Los niveles de contaminación de los lixiviados alcanzan concentraciones que superan los niveles universalmente aceptados, en más de 400 veces, en los casos de la demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO), en rangos diferentes, los metales pesados.

Las teorías más difundidas sobre la producción de lixiviados se desarrollan en países industrializados, donde se asume que estos líquidos se retienen (considerando sus bajos de MOP) y solo aparecen cuando están afectados por aguas lluvias.

Se han desarrollado ecuaciones (balance de aguas) y modelos, para determinar las producciones de lixiviados, basadas en las precipitaciones.

La experiencia en Guayaquil, demuestra que los RSU producen lixiviados sin adición de agua.

Los métodos generalmente usados para determinar la potencial producción de lixiviados en rellenos sanitarios están basados en el análisis de la producción de los componentes de los RSU vía desecación, pero este método no define el tiempo de degradación ni su distribución de la descomposición en líquidos y gases.

Las modelaciones se pueden desarrollar solo con los componentes normalizados de la caracterización.

2.5 Hipótesis general

Es posible modelar la producción de lixiviados de los residuos sólidos urbanos en Guayaquil, sin influencia de aguas lluvias.

2.5.1 Hipótesis específicas

Entre los componentes que mayormente generan líquidos están los restos de cítricos y plátano.

La mayor producción de lixiviados de los componentes putrescibles de los RSU (sin adición de agua) medidos en laboratorio, ocurre en los primeros 15 días.

Los lisímetros con combinaciones de materia orgánica putrescible menores al 50% no producen lixiviado.

Al comparar las modelaciones de producción de lixiviados, usando muestras con la composición de los componentes de los RSU de Guayaquil, entre los resultados en laboratorio, lisímetros y celdas “tipo” (experimentales), sus tendencias son semejantes, diferenciándose en los elementos de retención para cada caso.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Metodología de la investigación

Se usa el método de la investigación científica , para lo cual se constituyeron preguntas formulando la situación problemática, las observaciones sobre su justificación de investigación, la formulación de las hipótesis, experimentación, análisis de datos, rechazo o aceptación de las hipótesis y conclusión.

3.2. Tipo y diseño de Investigación

El tipo de investigación en su primera parte pasó por un proceso de investigación documental, porque previamente se hizo un análisis sobre la información escrita relacionada con muestras aleatorias realizadas por el Consorcio ILM Las Iguanas. Luego se realizó una investigación experimental y correlacional ya que “un experimento es un proceso planificado de investigar en el que al menos una variable experimental o independiente es operada intencionalmente por el investigador para conocer qué efectos produce esta en al menos otra variable llamada dependiente”. (Bernal, 2006). El enfoque correspondiente en esta metodología es cuantitativo, el tipo es “aplicada” a un tema puntual de producción de lixiviados y para su desarrollo se implementó una estrategia descriptiva. También se puede definir como una investigación inductiva, ya que se analizan independientemente cada componente de los residuos para determinar una producción general.

El diseño de investigación constituye el plan y estructura de la investigación (Kerlinger & Lee, 2002). El objetivo de esta investigación es modelar la producción de lixiviados generados por los RSU en lisímetros, celdas y laboratorio, para lo cual se requiere información sobre la caracterización de los RSU que ingresan al relleno sanitario de Guayaquil. Dado que el operador del RS Las Iguanas tiene registros de caracterizaciones realizadas en los años 2012, 2016 y 2017, se determinó la normalidad de las muestras, considerando que la hipótesis nula (H_0) tiene las medias semejantes con un intervalo de confianza de un 95% contra la hipótesis alterna de que no son semejantes. Esto se representa en el Cuadro 17:

Cuadro 17. Diseño de investigación de los componentes de la caracterización

MUESTAS	Elementos									Estrato socio-económico: BAJO, MEDIO BAJO, MEDIO, MEDIO ALTO, ALTO	Fecha: 2012, 2016, 2017
	% ORGANICOS	% PLÁSTICOS	% PAPEL Y CARTON	% VIDRIO	% METAL	% CAUCHO	% MADERA Y RESIDUOS DE PLANTAS	% TIERRA, PIEDRAS, MAT DE CONST.	% OTROS (pañales, tela, cuero, etc)		
1											
2											
.....											
183											

Fuente: Elaboración propia

Las variables independientes en este esquema son los estratos socioeconómicos y las fechas. Las variables dependientes son los componentes que constituyen los RSU. Esta información fue analizada con el método de normalización para pruebas no paramétricas Kolmogórov-Smirnov para verificar la normalidad de los resultados (hipótesis nula) de cada uno de los componentes. Se utilizó el programa de software libre R (versión 3.4).

Debido a que solo la materia orgánica produce lixiviados, esta investigación hizo una caracterización adicional de los componentes orgánicos con un esquema de diseño similar por estratos socioeconómicos. (Ver Cuadro 18)

Cuadro 18. Diseño de investigación de los componentes de la materia orgánica

MUESTAS	Elementos									Estrato socio-económico: BAJO, MEDIO BAJO, MEDIO, MEDIO ALTO, ALTO	Fecha
	% Comida preparada	Plátano verde	Yuca	Cítricos		
1											
2											
.....											
65											

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, con el método de Kolmogórov-Smirnov, se determinó la normalidad de los resultados (hipótesis nula), y se dejó en claro que gran parte de los componentes orgánicos son estacionales y no pueden presentarse en todo el año.

Con los resultados de la distribución de los componentes y sus proporciones, se trabajó en laboratorio usando recipientes de alrededor de 400 gramos. Se analizaron cada uno de los componentes de la materia orgánica para determinar su potencial producción de lixiviados en condiciones similares a un relleno sanitario (medio anaerobio y aerobio a 50°C de temperatura). Se compararon las curvas de producción de lixiviados que se generan. Para estos ensayos, se aplicó el esquema que se presenta en el cuadro 19

Cuadro 19. Diseño de investigación de los componentes orgánicos en laboratorio

MUESTAS	Elementos							
	% Comida preparada	# días ensayo	Plátano verde	# días ensayo	# días ensayo	# días ensayo
1								
2								
3								

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de estos resultados, se utilizó el programa de software libre R (versión 3.4) para pruebas no paramétricas para muestras relacionadas, donde se determinó la hipótesis nula que corresponde a la normalización de la muestra. Posteriormente, se compararon los resultados de estas muestras para determinar la diferencia en producción de lixiviados para un mismo elemento en los medios aerobio y anaerobio.

Con los resultados de las curvas de generación de lixiviados de cada uno de los componentes del proceso anaerobio y aerobio se generaron curvas, producto de la suma proporcional de los componentes que corresponden a la caracterización del relleno sanitario de Guayaquil, con un proceso inductivo (de lo particular a lo general) se determinó la producción general.

En lisímetros, se analizaron varias combinaciones de componentes de residuos en tanques de 1,2 toneladas de masa, con 30, 50, 60 y 100% de materia orgánica putrescibles MOP (restos de comida), los que también simulaban las condiciones de un relleno sanitario, el cual tiene 3 metros de altura, en condición anaerobia (aunque en su etapa inicial su condición es aerobia) con temperaturas de relleno sanitario. El esquema fue similar a los casos anteriores de varias muestras con composiciones semejantes. Los resultados se compararon con el programa de software libre R (versión 3.4), también se modelaron los resultados con métodos determinísticos (matemáticos) para dimensionar sus tendencias, siendo la mayoría Gaussianas.

De igual forma, se construyeron celdas “tipo” de RS con características similares a un relleno sanitario, de alrededor de 400 toneladas constituidas por residuos sólidos de Guayaquil. Con sus resultados se definieron las potenciales producciones de lixiviados.

Con las curvas de los tres procedimientos antes descritos, se obtuvo la producción diaria de lixiviados que generan los RSU, donde se modelaron los resultados con métodos determinísticos para graficar sus tendencias, siendo todas Gaussianas. Para obtener la modelación probabilística se determinó primero la curva que representa la producción de lixiviados acumulado generado por cada elemento. Las curvas deben cumplir las hipótesis nulas en la que ninguno de sus componentes sea igual a cero $H_0: \beta_i=0$; $H_i: \beta_i \neq 0$.

El esquema general de la investigación se describe en la Figura 15; se inició con el análisis de la composición del RS de Guayaquil comparando sus caracterizaciones de varios años para determinar sus efectos y en laboratorio producir una curva de producción de lixiviados. Otra curva se determinó usando lisímetros “piloto” y otra curva, proyectando los resultados de las celdas experimentales “tipo” de RS. Como efecto adicional se investigó en laboratorio la producción de lixiviados que se genera en condiciones aerobias

y anaerobias, para simular lo que ocurre en botaderos no controlados y celdas del relleno sanitario.

En los análisis usando lisímetros, se hicieron varias combinaciones de materia orgánica putrescible (MOP) (desechos de comida) para comprender cuáles son los niveles de retención o en qué condiciones de combinación de MOP genera lixiviados sin presencia de agua (lluvias, etc.) y entre las celdas se construyó una celda sin protección de AALL para analizar su rango de influencia.

Nota: RSU: residuos sólidos urbanos, MOP: materia orgánica putrescible, RSG: relleno sanitario de Guayaquil, CPL: curva de producción de lixiviados

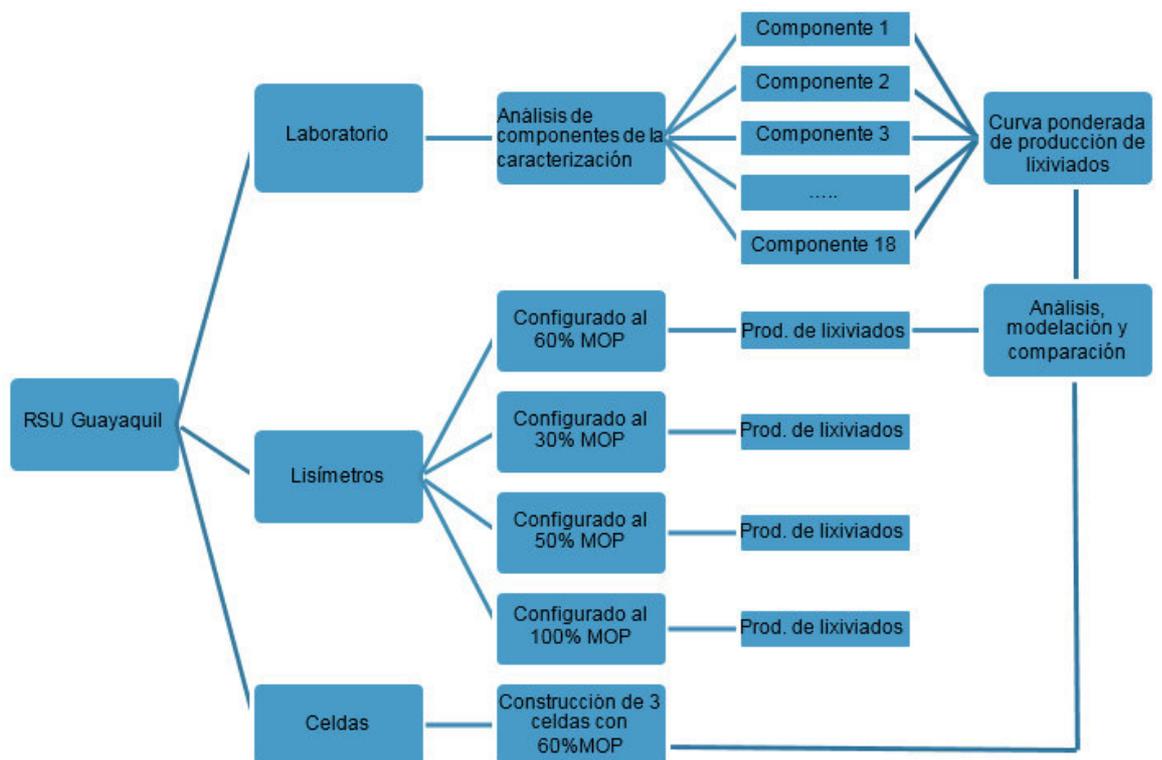


Figura 15. Esquema general de la investigación.

3.3. Técnica de recolección de datos y análisis en laboratorio

Se analizó la experiencia del operador del RS Las Iguanas, Consorcio ILM desde el año 1994 a la fecha, donde existen cinco sectores para recibir los residuos sólidos: dos de residuos secos o escombros (sector B y B') y tres de residuos sólidos orgánicos. De estos últimos sectores, dos están concluidos (sectores A y C) y uno en operación (sector D), cada uno de los cuales tiene diferencias en su sistema operativo. Con esta información, se realizaron gráficos relacionando la producción de lixiviados con toneladas acumuladas, producción por tonelada, producciones en lixiviados en sectores en operación y después del cierre de los rellenos. Este proceso se desarrolló en el numeral 4.1.1.

De la misma forma como se corrieron las fórmulas para calcular la producción de lixiviados por los métodos Corenostós, Suiza y Eva Röben (von Buchwald, 2009), se corrieron los programas de las producciones del programa Help y las del libro de Tchobanoglous, desarrollados en el numeral 4.1.4.

Para calcular el potencial volumen de producción de lixiviados, se caracterizaron los componentes orgánicos de los residuos que ingresan al relleno sanitario de Guayaquil, el tamaño y la selección de la muestra se determinó usando el procedimiento recomendado por CEPIS HDT N.º 97 de junio de 2005, lo que corresponde a analizar 63 camiones recolectores, la clasificación de los materiales se hizo mediante el "Método de cuarteo" (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, 2005) (Cantahede, 2005), estos a su vez reclasificados por la condición económica de la ciudad, establecida en cinco sectores: baja, media baja, media, media alta y alta, desarrollados en el numeral 4.1.2.

Dado que entre una de las posibilidades de retención de los lixiviados está la generada por absorción de los componentes de papel, cartón y derivados, se analizaron en laboratorio sus potenciales valores, los que se desarrollaron en el numeral 4.1.3.

Para representar las condiciones de temperatura que se dan en el interior de las celdas de los RS se investigó que estas oscilan entre 46° y 55°C, por lo

que se consideró una temperatura promedio de 50°C y los residuos están en condiciones aerobias inicialmente y posteriormente en condiciones anaerobias. Dado que no se ha encontrado un método que considere estas condiciones, se creó el Método gravimétrico por filtración en condiciones de relleno sanitario (MGFRS) (Figura 16), con este método se analizó en laboratorio cada uno de los componentes orgánicos, se graficó la producción diaria y posteriormente, se hizo una relación de todas las masas ponderadas para determinar una curva total de generación de lixiviados de los componentes putrescibles. (Ver desarrollo en el numeral 4.1.4.1)

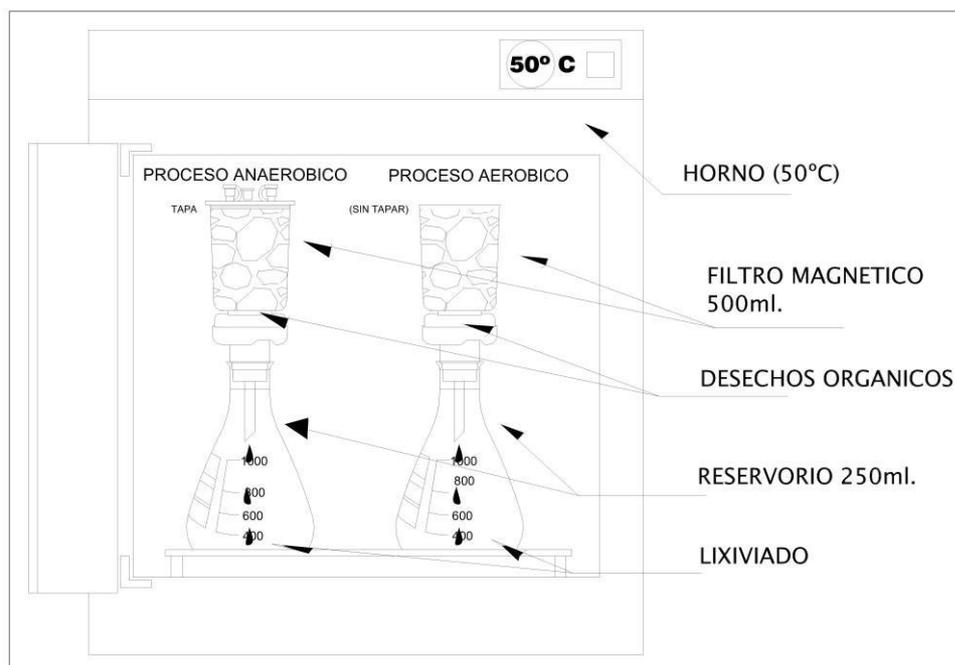


Figura 16 Corte transversal de elementos para la aplicación del método MGFRS

3.4. Producción de los lixiviados en tanques (lisímetros)

En este proceso, se buscó tener una producción de lixiviados que se ajuste a las condiciones de operación del relleno sanitario de Guayaquil, por lo que se construyeron tanques de polietileno de 3 metros de altura y de un metro de diámetro (ver Figura 17). La estructura exterior de los lisímetros tiene un balcón a una altura aproximada de 2 metros para facilitar su llenado.

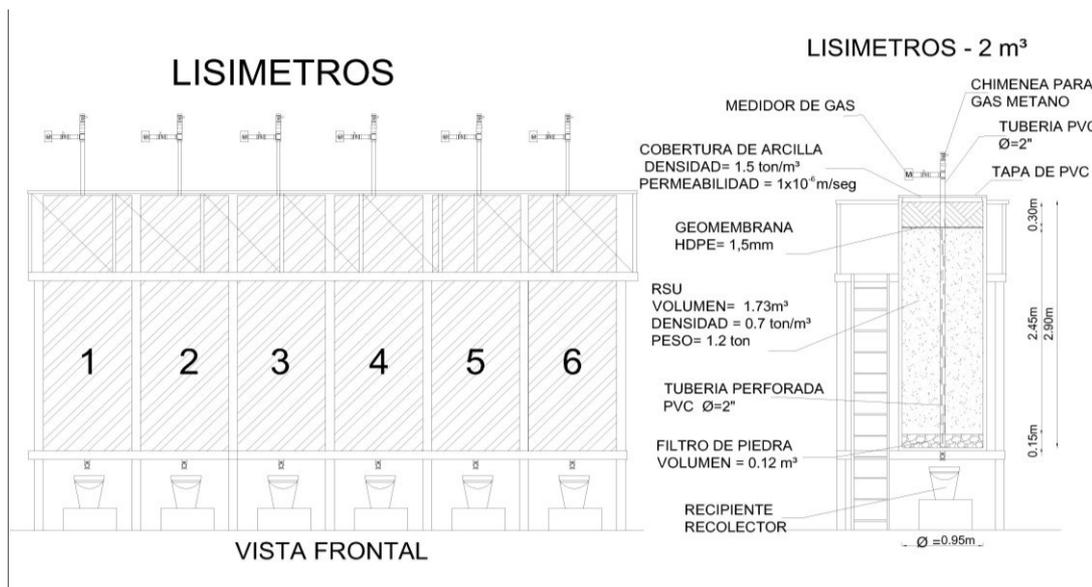


Figura 17. Corte transversal de los lisímetros

Seleccionada la muestra de un recolector de forma aleatoria, se procedió a descargarlo en la zona de caracterización, donde los residuos fueron extendidos por una pala manual. Primero se clasificaron los residuos separándolos en materia putrescible (residuos de comida), papel y cartón, plástico, caucho, vidrio, etc. Los residuos separados identificando cada uno de los componentes, fueron vertidos en tanques metálicos para que puedan ser pesados y sobre una geomembrana para que puedan ser mezclados con la proporción establecida; la mezcla se realizó de forma manual. Luego de que los residuos se mezclaron de manera homogénea, se vertieron otra vez en los tanques metálicos, transportados y finalmente vertidos en el lisímetro.

Las combinaciones de contenido que tienen los lisímetros correspondieron a diferentes condiciones preestablecidas. Unos tienen condiciones del relleno actual de Guayaquil: 60% material orgánico putrescible MOP (residuos de comida), otro el que representa las condiciones de Estados Unidos, 30% (para confirmar o descartar que esta combinación produce o no lixiviados), otro con las condiciones más críticas con el 100% de material orgánico putrescible, para determinar el mayor potencial de producción y otro con condiciones medias, con el 50% de MOP. (Ver desarrollo en numeral 4.1.4.5)

3.5. Producción de lixiviados en celdas “tipo” (experimentales) de RS.

A fin de replicar, en celdas experimentales “tipo”, las condiciones del relleno sanitario, se construyeron tres celdas con capacidad de alrededor de 400 toneladas de RSU (equivalentes al 10% de la cantidad que a diario se dispone en el RS Las Iguanas) (Ver figura 18). El proceso de construcción de las celdas fue el siguiente:

1. Se seleccionó un lugar donde se puedan implantar tres celdas con un área de aproximadamente 225 metros cuadrados cada una.
2. Se hizo una excavación equivalente al 50% de la capacidad de la celda, ya que el material producto de la excavación se lo utilizó para la cobertura de los RSU.
3. Se excavó hasta una profundidad de 2,50 metros, dejando taludes con pendientes 2:1, a fin de garantizar la estabilidad de los mismos. Para este trabajo, se usó una excavadora de 130 hp. Los taludes y el fondo fueron perfilados teniendo la precaución de que, en la superficie, no aflore material pétreo con aristas.
4. Se instaló una geomembrana de polietileno de alta densidad de 1mm de espesor con el fin de garantizar la impermeabilidad del fondo de las celdas, las uniones de la geomembrana fueron termo selladas.
5. Sobre la geomembrana, se colocó una capa protectora de arcilla con un espesor de 20 cm constituida por material pasante del tamiz #200 con el fin de evitar cortes o punzamientos que pudieran producirse por elementos corto-punzantes de los desechos.
6. Sobre la capa protectora, se colocó una capa drenante de espesor de 20 cm, constituido por material pétreo con diámetro de 6 cm.
7. En la parte más baja de la capa drenante, se instaló una tubería perforada de PVC de diámetro 150 mm con el fin captar los lixiviados y canalizarlos hacia el exterior de las celdas. Esta tubería llegó hasta los tanques reservorios instalados en el exterior de las celdas, la tubería tiene perforaciones únicamente en el tramo interior de la celda.
8. Sobre la capa drenante, se colocaron los RSU tomados de los camiones recolectores provenientes de sectores que presentan la

caracterización promedio de la ciudad, considerando que los recolectores tienen capacidad de 15 toneladas, se usaron entre 25 y 30 viajes para cada celda.

9. Los RSU fueron tendidos con la ayuda de una excavadora de 130 hp en capas de 50 cm de altura, los RSU fueron compactados con un rodillo para relleno sanitario de 40 toneladas. La altura total de las celdas fue de 5 m, altura similar a cada capa del RS Las Iguanas.

Sobre los RSU, en la primera celda, se colocó una capa de cobertura de espesor 30 cm constituida por el material arcilloso producto de la excavación lateral.

En la segunda celda, sobre los RSU, se instaló geomembrana de polietileno de alta densidad $e = 1\text{mm}$; sobre este material se colocó la capa final de cobertura descrita en el punto anterior.

En la tercera celda, la geomembrana de polietileno de alta densidad $e = 1\text{mm}$ se colocó sobre la capa de cobertura.

En el centro de cada celda, se instaló una chimenea para la evacuación del biogás. Esta chimenea tiene un diámetro de 50cm formada por material pétreo triturado de diámetro $\varnothing = 6\text{ cm}$ y tubería PVC de diámetro $\varnothing = 100\text{ mm}$ perforada en el tramo interior de la celda (donde están los RSU) y sobresale 1,00 m sobre la capa de cobertura.

En el extremo superior de la tubería de PVC de las chimeneas, se acopló una tubería de hierro galvanizado de diámetro $\varnothing = 50\text{ mm}$ de 1,50 de altura. Sobre este, se instaló un quemador de biogás.

Para monitorear la producción de lixiviados, se instaló, en cada celda, un tanque de PVC con capacidad de 1000 litros, en donde se almacena el líquido drenado mediante la tubería de PVC $\varnothing = 150\text{mm}$ instalada en el fondo de cada celda.

Es importante destacar que, para la instalación de las tuberías, fue necesario perforar la geomembrana, por lo que estas juntas fueron selladas para evitar filtraciones o infiltraciones.

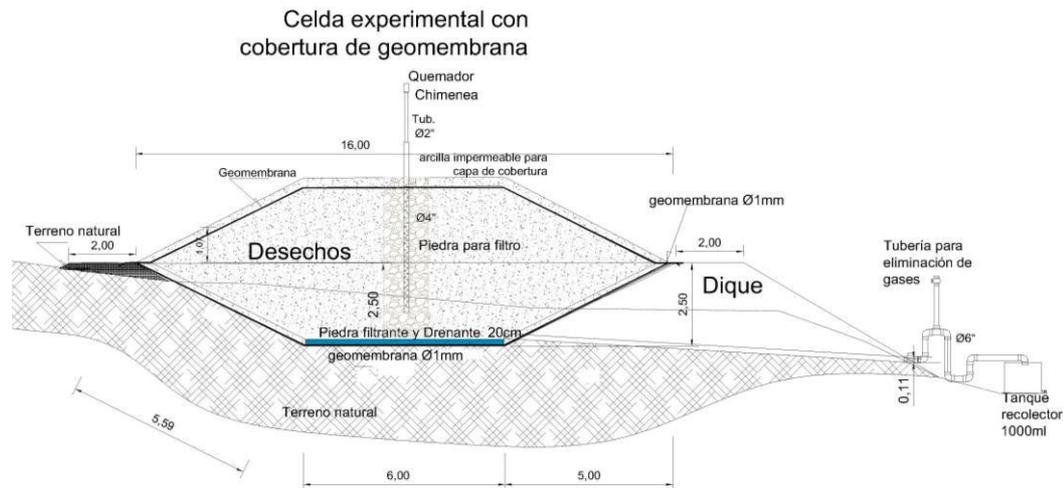


Figura 18. Corte transversal de la celda “tipo”

Los RSU que se recibieron en estas celdas correspondieron a recolectores de sectores representativos de la ciudad, producto del análisis de rutas y condiciones económicas definidas anteriormente. Posteriormente, se obtuvieron los resultados de producción de lixiviados de cada celda, desarrollado en el numeral 4.1.4.6.

3.6. Análisis e interpretación de la información

La investigación de la producción de lixiviados de residuos sólidos urbanos con altos contenidos de materia orgánica putrescible, vía modelación de diferentes experimentos similares a la condición de un relleno sanitario, requiere recopilación de información, a la cual se aplicará una variante del “método histórico”. Este consiste en averiguar qué han pensado y escrito otros autores acerca del problema en cuestión, por qué han tenido que afrontarlo, cómo lo han formulado y cómo han tratado de resolverlo (Popper, 2016, p. 23). Para determinar la homogeneidad o normalización de la información o muestras experimentales con ejercicios estadísticos, se determinó su falsedad o verificación sobre las normalidades de las distribuciones de los componentes y las variaciones de la producción de lixiviados de los componentes que constituyen los residuos sólidos urbanos. Como señala Schlick (1921) un auténtico enunciado tiene que ser susceptible de

verificación concluyente. En suma, el paradigma cuantitativo emplea un modelo cerrado de razonamiento lógico-deductivo desde la teoría a las proposiciones, la formación de concepto, la definición operacional, la medición de las definiciones operacionales, la recogida de datos, la comprobación de hipótesis y el análisis (Muñoz, 2007).

Se hizo un análisis descriptivo de la producción de lixiviados obtenida en laboratorio, lisímetros y celdas “tipo” de RS, para luego hacer la comparación.

Para determinar la homogeneidad de los componentes que constituyen los RSU, se utilizó la prueba estadística de coeficiente de variabilidad (CV). Finalmente, al acumular las producciones de lixiviados, se buscaron las ecuaciones que cumplan con las hipótesis $H_0: \beta_i=0$; $H_1: \beta_i \neq 0$ para determinar la modelación de la producción de lixiviados en laboratorio, lisímetros y celdas.

La modelación de las tendencias de generación diaria de lixiviados en lisímetros y celdas “tipo” se analizaron con métodos probabilísticos y determinísticos, los primeros son modelos matemáticos (estadísticos) que reproducen los fenómenos o hechos observados de la mejor manera posible, teniendo en cuenta los datos suministrados y la influencia del azar sobre las observaciones, con un error aleatorio (5%) que es consecuencia de no incluir algunas variables en el modelo; los modelos determinísticos son expresiones matemáticas de datos observados, libres del azar, por tanto el error es matemático, no aleatorio. Para extrapolar resultados, solo los métodos probabilísticos (estadísticos) son válidos, razón por la que las proyecciones de producción de lixiviados se relacionaron con modelos estadísticos (probabilísticos).

Al comparar las tendencias y los resultados de las diferentes modelaciones, se plantearon las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis, interpretación y discusión de los resultados

4.1.1 Análisis de la caracterización de los residuos sólidos urbanos del RS de Guayaquil

Para determinar la producción potencial de lixiviados de los RSU se analizaron las caracterizaciones disponibles del RS de Guayaquil, de los años 2012, 2016 y 2017 en total 192 muestras clasificadas por condición económica, en 9 componentes, esta información se la tabuló (ver Cuadro 20) por año y por condición económica con la idea de determinar el nivel de homogeneidad en los resultados, se calculó el coeficiente de variabilidad para cada elemento y por condición económica, y se graficaron los resultados, los que se aprecian en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Caracterización de residuos sólidos municipales Relleno Sanitario Las Iguanas

CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES - RELLENO SANITARIO LAS IGUANAS - GUAYAQUIL ECUADOR				2012		2016		2017		2012 2016 2017	
ESTRATO	BAJO	2012		2016		2017		C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN
		C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN				
DESECHOS		8,10%	61,36%	7,74%	60,46%	17,59%	61,65%	10,50%	61,07%		
ORGANICOS		19,19%	13,05%	27,63%	15,54%	26,39%	14,25%	25,48%	14,28%		
PLASTICOS		19,98%	10,77%	23,11%	7,91%	37,01%	8,45%	28,29%	9,14%		
PAPEL Y CARTON		53,90%	1,83%	66,88%	2,37%	56,20%	1,08%	67,87%	1,87%		
VIDRIO		52,69%	0,69%	103,96%	1,47%	88,31%	1,28%	101,53%	1,12%		
METAL		140,44%	0,58%	200,05%	0,81%	0,00%	0,00%	212,79%	0,54%		
CAUCHO		102,19%	1,52%	83,33%	2,41%	93,44%	2,40%	91,93%	2,06%		
MADERA Y RESIDUOS DE PLANTAS		112,72%	1,62%	140,50%	1,32%	117,86%	2,10%	121,55%	1,61%		
TIERRA, PIEDRAS, MAT DE CONST.		37,52%	8,59%	37,63%	7,70%	38,03%	8,80%	37,08%	8,29%		
OTROS (pañales, tela, cuero, etc)											
ESTRATO	MEDIO BAJO		23,577%		23,596%		36,810%		2012 2016 2017		
DESECHOS			CARACTERIZACIÓN		CARACTERIZACIÓN		CARACTERIZACIÓN		CARACTERIZACIÓN		
ORGANICOS		5,79%	58,03%	8,32%	60,31%	11,71%	58,59%	9,66%	58,91%		
PLASTICOS		14,43%	15,71%	37,47%	13,63%	35,15%	13,49%	31,34%	14,07%		
PAPEL Y CARTON		29,87%	10,70%	43,41%	8,72%	42,93%	6,46%	44,20%	8,10%		
VIDRIO		63,95%	1,88%	47,60%	2,30%	74,09%	1,42%	64,81%	1,76%		
METAL		47,67%	0,89%	90,75%	1,15%	79,52%	0,67%	82,44%	0,85%		
CAUCHO		141,88%	0,56%	126,85%	0,80%	146,25%	0,23%	156,28%	0,46%		
MADERA Y RESIDUOS DE PLANTAS		61,33%	2,26%	96,08%	2,86%	82,29%	3,76%	85,98%	3,15%		
TIERRA, PIEDRAS, MAT DE CONST.		83,29%	1,89%	108,11%	2,29%	92,23%	7,72%	121,04%	4,86%		
OTROS (pañales, tela, cuero, etc)		37,57%	8,09%	36,94%	7,94%	37,95%	7,66%	36,98%	7,84%		
ESTRATO	MEDIO		12,012%		25,657%		22,950%		2012 2016 2017		
DESECHOS			CARACTERIZACIÓN		CARACTERIZACIÓN		CARACTERIZACIÓN		CARACTERIZACIÓN		
ORGANICOS		9,80%	56,45%	10,32%	56,50%	18,92%	61,78%	13,65%	57,95%		
PLASTICOS		28,66%	13,96%	32,97%	13,71%	37,71%	14,02%	32,35%	13,86%		
PAPEL Y CARTON		32,81%	12,33%	41,76%	7,53%	42,15%	6,47%	46,63%	8,40%		
VIDRIO		87,93%	2,76%	47,76%	3,83%	72,67%	1,76%	67,05%	3,01%		
METAL		51,62%	0,66%	77,60%	1,79%	73,50%	0,51%	99,20%	1,17%		
CAUCHO		194,09%	0,29%	71,81%	1,70%	208,01%	0,29%	120,29%	0,97%		
MADERA Y RESIDUOS DE PLANTAS		77,41%	2,64%	100,60%	3,90%	109,76%	2,56%	100,59%	3,23%		
TIERRA, PIEDRAS, MAT DE CONST.		156,51%	4,60%	119,88%	2,64%	53,36%	4,98%	116,24%	3,75%		
OTROS (pañales, tela, cuero, etc)		45,04%	6,31%	33,27%	8,40%	25,36%	7,64%	34,66%	7,69%		

ESTRATO	MEDIO ALTO		20,290%		16,265%		14,040%		2012 2016 2017	
	C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN
DESECHOS ORGANICOS	9,27%	60,01%	15,70%	59,23%	22,75%	53,57%	14,58%	58,46%		
PLASTICOS	22,58%	14,80%	25,57%	12,85%	14,97%	16,53%	23,14%	14,49%		
PAPEL Y CARTON	34,85%	13,11%	54,85%	9,02%	72,70%	11,73%	49,98%	11,47%		
VIDRIO	39,56%	2,30%	57,08%	4,56%	68,12%	2,00%	67,38%	2,99%		
METAL	59,12%	0,78%	73,72%	2,28%	144,31%	1,43%	104,26%	1,41%		
CAUCHO	278,03%	0,16%	152,55%	1,56%	122,47%	0,13%	243,80%	0,62%		
MADERA Y RESIDUOS DE PLANTAS	66,97%	1,42%	123,09%	3,40%	138,80%	2,70%	129,12%	2,33%		
TIERRA, PIEDRAS, MAT DE CONST.	87,74%	1,35%	80,75%	1,82%	86,42%	4,03%	103,35%	2,04%		
OTROS (pañales, tela, cuero, etc)	48,02%	6,07%	57,12%	5,29%	32,70%	7,87%	47,68%	6,17%		
ESTRATO	ALTO	2012	2016	2017	2012 2016 2017					
		19,947%	15,654%	3,880%						
DESECHOS ORGANICOS	C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN	C.V.	CARACTERIZACIÓN
		55,84%	55,44%	55,40%	14,22%	55,65%	14,22%	55,65%	14,22%	55,65%
PLASTICOS		14,96%	16,23%	16,33%	22,09%	15,58%	21,00%	15,58%	21,00%	15,58%
PAPEL Y CARTON		15,12%	11,36%	7,13%	25,44%	12,84%	38,51%	12,84%	38,51%	12,84%
VIDRIO		3,97%	2,30%	4,33%	85,27%	3,39%	81,50%	3,39%	81,50%	3,39%
METAL		1,04%	1,89%	1,40%	49,49%	1,39%	74,48%	1,39%	74,48%	1,39%
CAUCHO		0,51%	0,93%	0,13%	173,21%	0,62%	168,78%	0,62%	168,78%	0,62%
MADERA Y RESIDUOS DE PLANTAS		1,94%	3,52%	1,33%	31,22%	2,46%	84,01%	2,46%	84,01%	2,46%
TIERRA, PIEDRAS, MAT DE CONST.		1,46%	1,04%	6,07%	57,61%	1,82%	133,88%	1,82%	133,88%	1,82%
OTROS (pañales, tela, cuero, etc)		5,15%	7,29%	7,87%	35,62%	6,24%	42,23%	6,24%	42,23%	6,24%
CARACTERIZACIÓN GENERAL		2012	2016	2017						
		PROMEDIO PONDERADO	PROMEDIO PONDERADO	PROMEDIO PONDERADO						
ORGANICOS		58,6%	58,4%	59,2%			12,31%	58,6%		
PLASTICOS		14,5%	14,3%	14,3%			27,56%	14,4%		
PAPEL Y CARTON		12,3%	8,7%	7,7%			46,31%	9,6%		
VIDRIO		2,5%	3,1%	1,6%			77,58%	2,5%		
METAL		0,8%	1,7%	0,9%			96,03%	1,1%		
CAUCHO		0,4%	1,2%	0,2%			177,77%	0,6%		
MADERA Y RESIDUOS DE PLANTAS		1,9%	3,2%	2,9%			98,04%	2,7%		
TIERRA, PIEDRAS, MAT DE CONST.		2,0%	1,9%	5,3%			137,16%	3,1%		
OTROS (pañales, tela, cuero, etc)		7,0%	7,5%	7,9%			39,91%	7,4%		

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la caracterización (Cuadro 20) demuestran que, en todas las condiciones económicas, la materia orgánica putrescible (MOP) es la que tiene mayor proporción con una variación de 61% para personas con condición económica baja y 55% para la condición económica alta. El promedio ponderado es 58,6% y tiene un coeficiente de variabilidad (CV) del 12%, seguido por plásticos con un promedio ponderado del 14%; el coeficiente de variabilidad es también menor al 30%, lo que Tinoco, Crispín y Rosales (2009) consideran como homogéneo. El resto de productos (38%) tienen valores heterogéneos. En los gráficos de la Figura 19 se aprecian los resultados de cada estrato económico y en el último gráfico se representa el resumen ponderado de la caracterización de los RSU de Guayaquil.

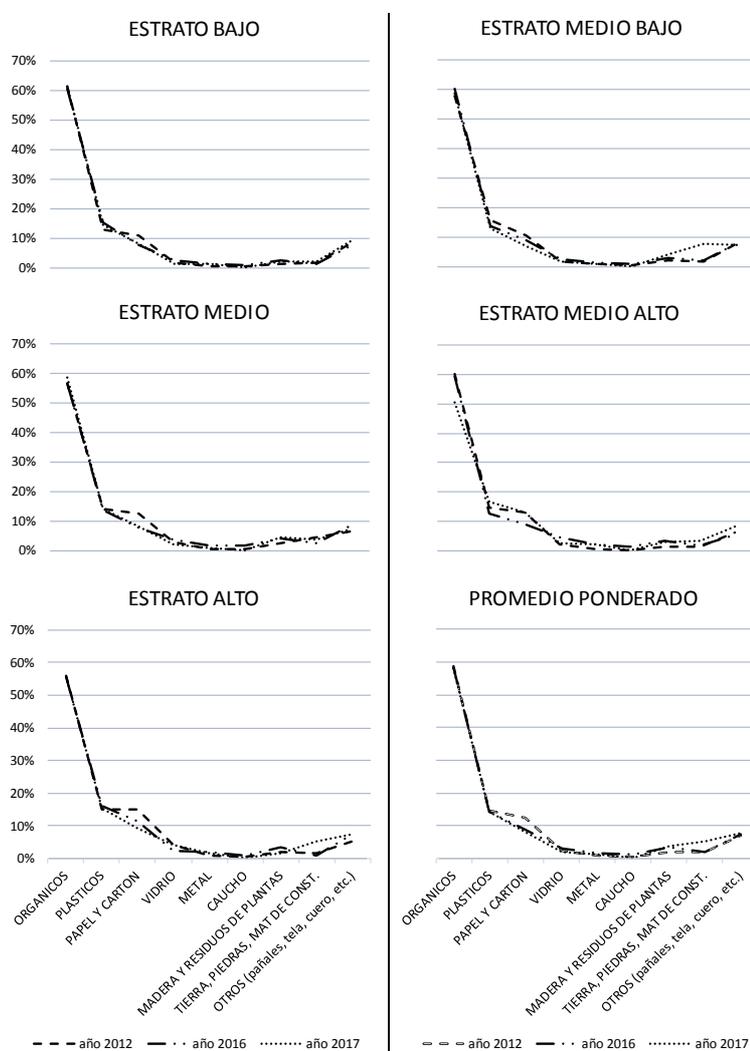


Figura 19 Caracterización por estratos socioeconómicos.

Para modelar fenómenos naturales, sociales y psicológicos, estos deben tener una distribución normal (Gómez Chacón, 2010), también llamada distribución de Gauss o distribución Gaussiana. En nuestro caso, se buscó hacer una modelación con los datos de la caracterización de los RSU de la ciudad de Guayaquil, haciendo estudios estadísticos (descriptivos) de cada uno de los componentes que la conforman.

Para determinar si la distribución de la variable aleatoria de los componentes es normal, se pueden hacer pruebas de Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk o Kolmogórov-Smirnov. Consideramos apropiada la prueba Kolmogorov-Smirnov por ser la más robusta en el análisis con datos dispersos (es la prueba que utiliza el mayor error posible). Para correr las pruebas, utilizamos el programa estadístico R (versión 3.4).

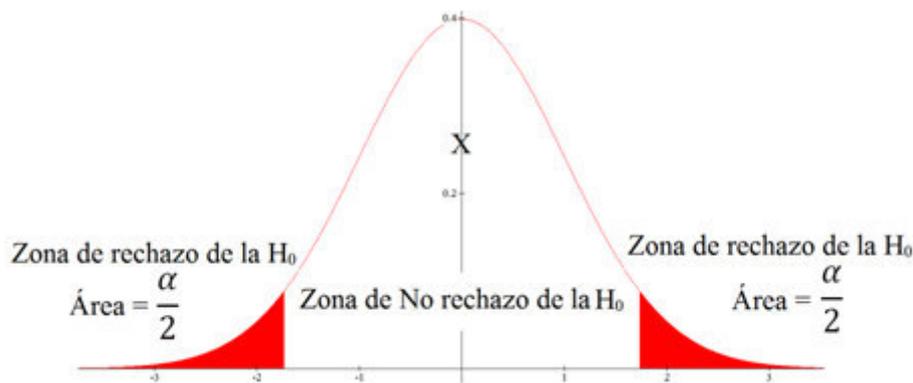


Figura 20 Prueba de dos colas. Suárez (2012)

El test de normalidad al 95% de intervalo de confianza (ver Figura 20) de los componentes que constituyen la clasificación generalmente utilizada (con 9 componentes) arroja los resultados detallados en el Cuadro 21.

Cuadro 21 Test de normalidad de componentes de caracterización de RSU años 2012, 2016 y 2017

TEST DE NORMALIDAD

	test	Normalidad	Datos	Ceros
[1.] "ORGANICOS.."	"0.6106"	"SI NORMAL"	"183"	"0"
[2.] "PLASTICOS.."	"0.2351"	"SI NORMAL"	"183"	"0"
[3.] "PAPEL.Y.CARTON.."	"0.0471"	"NO"	"183"	"0"
[4.] "VIDRIO.."	"0.0057"	"NO"	"182"	"1"
[5.] "METAL.."	"4.1795e-07"	"NO"	"179"	"4"
[6.] "CAUCHO.."	"2.0347e-12"	"NO"	"83"	"100"
[7.] "MADER.Y.RES.PLAN"	"7.0049e-05"	"NO"	"180"	"3"
[8.] "TIERRA..PIEDRAS."	"7.6992e-08"	"NO"	"151"	"32"
[9.] "OTROS..pañales..."	"0.68756817"	"SI NORMAL"	"183"	"0"

Fuente: Elaboración propia

Los componentes cuyas muestras aleatorias presentan una normalidad son orgánicos (59%), plásticos (14%) y otros (7.4%), lo que suma más del 80% de la masa. Por esta razón, se pueden modelar los resultados futuros, aunque con una gran variabilidad.

Analizando los componentes por sub-grupos, encontramos que adicionalmente a los componentes que tenían normalidad de sus muestras en el análisis integral, presentan normalidad componentes como el papel y el cartón. En algunos de los sub-grupos, componentes como materiales de construcción, también tienen normalidad (ver Anexo 4).

4.1.2 Clasificación de la materia orgánica putrescible (MOP)

Dado que los materiales putrescibles son los potenciales productores de lixiviados, para determinar su volumen, como parte investigativa de ésta tesis, se hizo (en el año 2016) una caracterización de cada uno de los componentes que constituyen la materia orgánica y se tomaron muestras representativas por estrato socioeconómico de acuerdo al método del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS), a través de lo cual se determinó que se necesitaban 63 muestras; sin embargo, se realizaron 65, las que fueron seleccionadas en el relleno sanitario.

Se desglosó en cada una de estas muestras la composición de los materiales putrescibles y los materiales absorbentes. Así, en el sector socioeconómico bajo, en promedio, la cáscara de plátano verde corresponde al 23,7% de la materia orgánica; los restos de comida preparada, al 22,5%; y los cítricos, al 11,8%. En el sector socioeconómico medio bajo, la comida preparada y la cáscara de plátano verde representan en promedio el 23,7% y 23,3%, seguidos de los cítricos con un porcentaje promedio del 11,8%. En el sector socioeconómico medio, el mayor porcentaje promedio de materia orgánica corresponde a la cáscara de plátano verde (25,8%), seguido de los restos de comida preparada (18,1%), los cítricos (11,7%), el choclo (10,7%), el coco (6,9%), mientras que los demás componentes tienen porcentajes menores. El mayor porcentaje promedio entre la materia orgánica en el estrato socioeconómico medio alto lo ocupa la cáscara de plátano verde con un 26,3%, seguido de los cítricos con un 17,7%, la comida preparada con un 13,9%, choclo con un 10,6%, coco con 6% y el resto de componentes con menor porcentaje. En el sector económico alto, los restos de comida preparada en promedio predominan la composición de la materia orgánica (25,4%), seguido de la cáscara de plátano verde (24%), los cítricos (10,5%), coco (7,5%) y choclo (6,1%), cuyos detalles se pueden apreciar en la Figura 21.

Dado que en el proceso de análisis se determinaron los componentes que constituyen la materia orgánica putrescible y considerando que los nombres comunes no son reconocidos universalmente, a continuación, se presentan los nombres científicos (Cuadro 22).

Cuadro 22. Nombres científicos de los componentes de la materia orgánica de los RSU de Guayaquil

Materia orgánica (nombre común)	Materia orgánica (nombre científico)
Choclo	Zea Mays
Cítricos	Genero Citrus
Restos de comida preparada	-
Restos de jardinería	-
Cáscara de plátano verde	Musa Sapientum L.var.Paradisiaca
Guaba	Inga Feuilleei
Cangrejo	Brachyura
Culantro	Coriandrum Sativum
Coco	Cocos Nucifera
Concha	Anadara Tuberculosa
Sandía	Citrullus Lanatus
Maracuya	Passiflora Edulis
Lechuga	Lactuca Sativa
Piña	Ananas Comosus
Mango	Mangifera Indica
Yuca	Manihot Esculenta
Zapallo	Cucurbita Maxima

Fuente: (Botanical, 2018)

La distribución de los diferentes elementos orgánicos clasificados en diferentes estratos económicos se encuentra en la Figura 21.

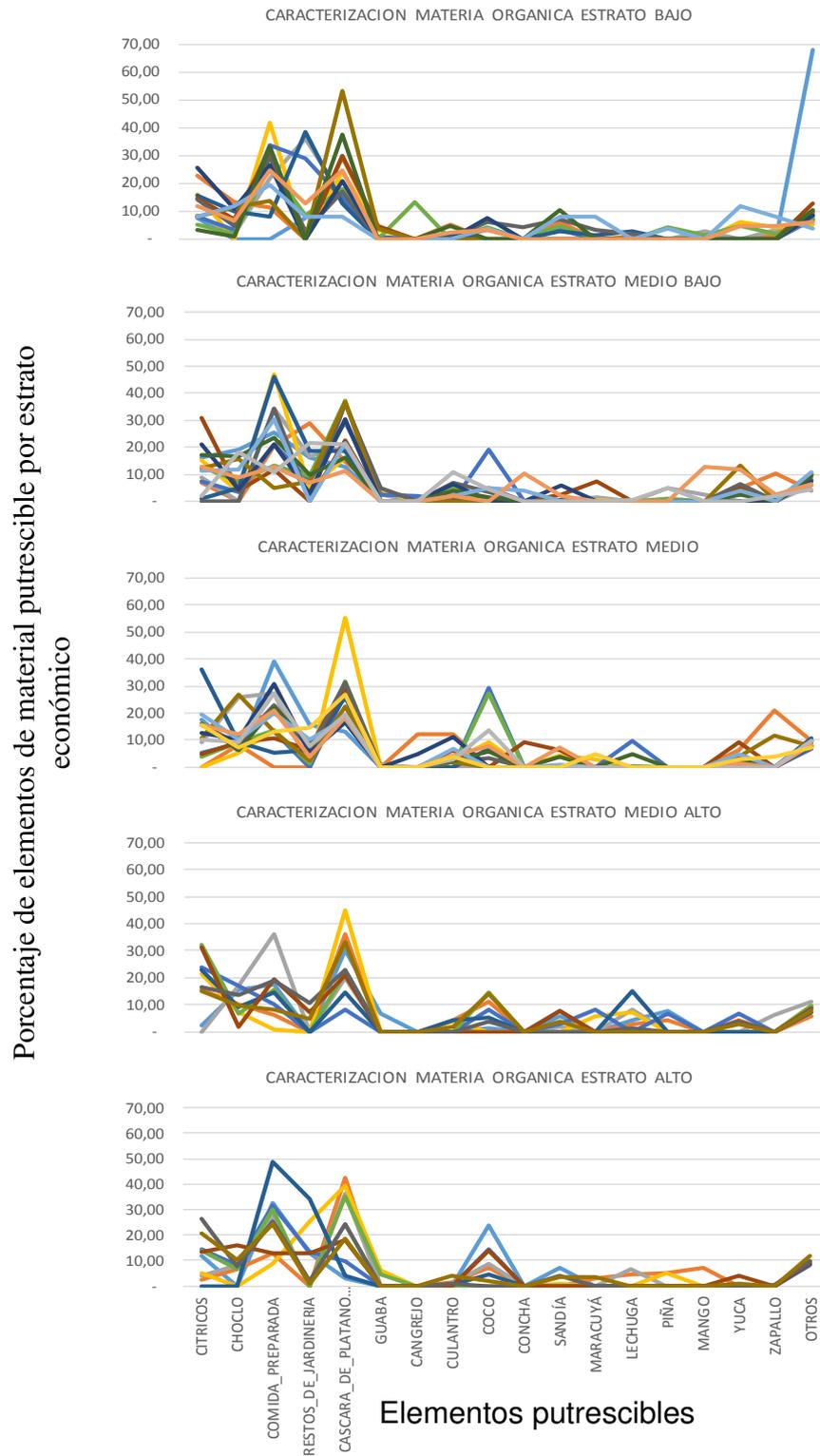


Figura 21 **Composición de la materia orgánica por estrato socioeconómico.**

En la Figura 22, se pueden apreciar los resultados de los porcentajes de los componentes de cada estrato socioeconómico que constituyen los materiales orgánicos putrescibles MOP.

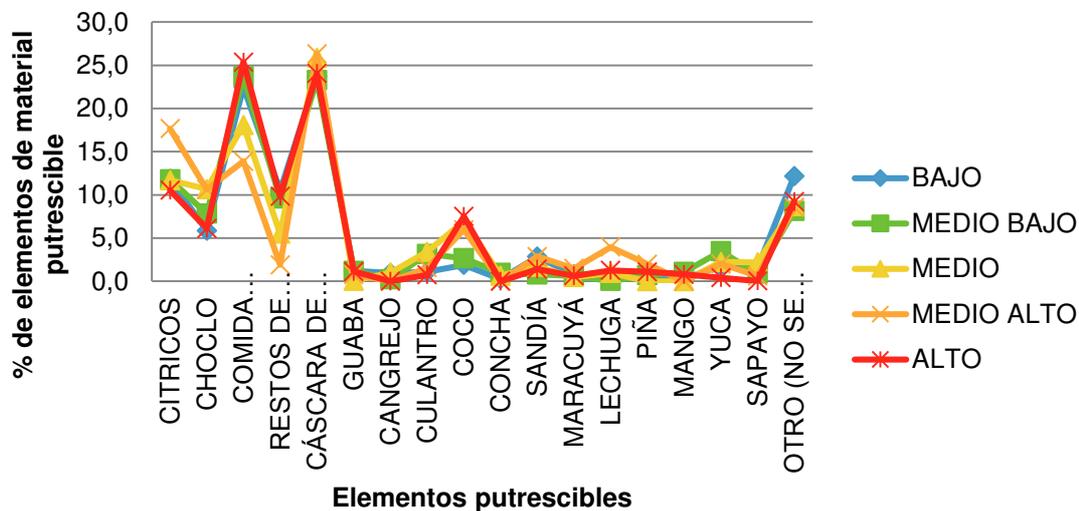


Figura 22 Composición del material putrescible en función de estratos socioeconómicos.

El promedio ponderado está ajustado a las proporciones de cada uno de los sectores socioeconómicos detallados en el Cuadro 23. El detalle de cada una de las 65 muestras se incluye en el Anexo 2.

Con el promedio ponderado de todos los sectores socioeconómicos, determinamos que el mayor componente de la materia orgánica de los RSU de Guayaquil es la cáscara de plátano verde (24,65%), seguido de los restos de comida preparada (20,70%), los cítricos (12,53%), otros (9,4%), choclo (8,37%), restos de jardinería (7,49%), el resto de los componentes tienen menos del 5%. Ver Figura 22.

Cuadro 23. Composición del material putrescible en función de estratos socioeconómicos referido a los resultados de caracterización del RS Las Iguanas 2016

ESTRATOS SOCIOECONOMICOS 2016	BAJO	MEDIO BAJO	MEDIO O	MEDIO ALTO	ALTO	PROMEDIO PONDERADO
CARACTERIZACION MOP	%	%	%	%	%	%
CITRICOS	2.23	2.78	3.00	2.87	1.65	12.53
CHOCLO	1.10	1.85	2.73	1.73	0.96	8.37
COMIDA_PREPARADA	4.24	5.60	4.63	2.26	3.97	20.70
RESTOS_DE_JARDINERIA	1.97	2.26	1.41	0.31	1.54	7.49
CASCARA_DE_PLATANO_VERDE	4.46	5.50	6.64	4.28	3.76	24.65
GUABA	0.22	0.28	0.01	0.12	0.17	0.82
CANGREJO	0.18	0.05	0.26	-	-	0.48
CULANTRO	0.20	0.75	0.87	0.25	0.11	2.19
COCO	0.35	0.63	1.78	0.97	1.17	4.90
CONCHA	0.05	0.22	0.16	-	-	0.44
SANDÍA	0.53	0.19	0.43	0.47	0.22	1.83
MARACUYÁ	0.14	0.14	0.12	0.24	0.10	0.74
LECHUGA	0.07	0.01	0.25	0.64	0.20	1.16
PIÑA	0.10	0.16	-	0.32	0.17	0.75
MANGO	0.05	0.25	-	-	0.12	0.43
YUCA	0.34	0.82	0.57	0.33	0.06	2.11
ZAPALLO	0.29	0.21	0.56	0.10	0.01	1.16
OTROS	2.29	1.92	2.23	1.39	1.44	9.27
SUMA	18.83	23.60	25.66	16.27	15.65	100.00

La representación gráfica de los promedios ponderados de los componentes de la materia orgánica se encuentra en la Figura 23.

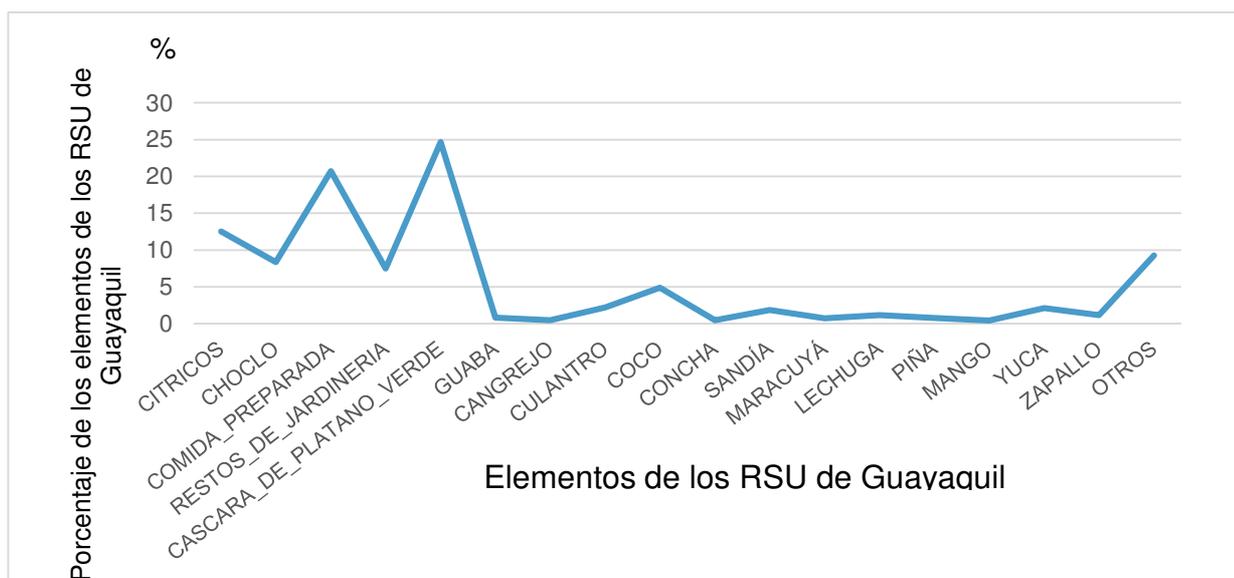


Figura 23 Promedio ponderado de composición de la materia orgánica de los RSU de Guayaquil (todos los sectores socioeconómicos).

Para validar estadísticamente los resultados anteriores, se ha hecho un análisis de los promedios usando el coeficiente de variabilidad (CV). (Ver Anexo 2).

De acuerdo con Tinoco et.al. (2009), los valores de CV mayores a 30 indican una distribución heterogénea, es decir, los datos son más dispersos, de tal forma que la distribución homogénea se da en los cuatro componentes más significativos de los análisis de la materia orgánica putrescible (MOP) (Anexo 2). Estos suman más del 74% e incluyen los siguientes: cáscara de verde (24%), con un CV de 5%; otros (9.35%) con un CV de 17.4%; cítricos (12,7%) con un CV de 22%; comida preparada (20,7%), con un CV de 22%; y choclo (8,21%), con un CV de 28%

Dado que el objeto principal de la investigación es determinar la modelación de los resultados y ésta se realiza sobre los componentes que tengan normalidad, para determinar esta normalidad se usó la prueba Kolmogorov-Smirnov con el programa estadístico R (versión 3.4). (Ver Anexo 4).

Cuadro 24 Test de normalidad usando prueba Kolmogorov-Smirnov para componentes orgánicos putrescibles año 2016

TEST DE NORMALIDAD

	test	Normalidad	Datos	Ceros
[1,] "CITRICOS"	"0.5466"	"SI NORMAL"	"60"	"5"
[2,] "CHOCLO"	"0.4611"	"SI NORMAL"	"57"	"8"
[3,] "COMIDA_PREPARADA"	"0.4421"	"SI NORMAL"	"63"	"2"
[4,] "RESTOS_DE_JARDINER"	"0.0085"	"NO"	"42"	"23"
[5,] "CASC_PLAT_VERDE"	"0.5007"	"SI NORMAL"	"65"	"0"
[6,] "GUABA"	"8.4054e-13"	"NO"	"14"	"51"
[7,] "CANGREJO"	"4.3298e-15"	"NO"	"5"	"60"
[8,] "CULANTRO"	"0.0029"	"NO"	"37"	"28"
[9,] "COCO"	"0.00104"	"NO"	"35"	"30"
[10,] "CONCHA"	"3.3306e-16"	"NO"	"4"	"61"
[11,] "SANDÍA"	"1.6228e-06"	"NO"	"28"	"37"
[12,] "MARACUYÁ"	"5.9574e-13"	"NO"	"12"	"53"
[13,] "LECHUGA"	"4.2262e-11"	"NO"	"15"	"50"
[14,] "PIÑA"	"9.8809e-15"	"NO"	"10"	"55"
[15,] "MANGO"	"1.4432e-15"	"NO"	"5"	"60"
[16,] "YUCA"	"1.8271e-06"	"NO"	"28"	"37"
[17,] "ZAPALLO"	"7.77775e-11"	"NO"	"15"	"50"
[18,] "OTROS"	"0.7241"	"SI NORMAL"	"65"	"0"

	test	Normalidad	Datos	Ceros
[1,] "PLASTICOS.."	"0.5044"	"SI NORMAL"	"65"	"0"
[2,] "PAPEL.Y.CARTON.."	"0.1154"	"SI NORMAL"	"65"	"0"
[3,] "VIDRIO.."	"0.3324"	"SI NORMAL"	"64"	"1"
[4,] "METAL.."	"0.0355"	"NO"	"65"	"0"
[5,] "CAUCHO.."	"0.0025"	"NO"	"37"	"28"
[6,] "MADERA.RESIDPLANT"	"0.0986"	"SI NORMAL"	"63"	"2"
[7,] "TIERR.PIED.MAT.CON"	"0.0131"	"NO"	"41"	"24"
[8,] "OTROS.cuero..etc."	"0.8933"	"SI NORMAL"	"65"	"0"

En las muestras de los RSU obtenidos de los recolectores en el Relleno Sanitario Las Iguanas, se puede determinar que algunos de los componentes tienen valores muy bajos en normalidad, porque su presencia en las muestras es estacional, es decir, no se presentan todo el año, tales como guaba, cangrejo, sandía, mango, etc. Sin embargo, hay componentes que aparecen en más de 30 muestras con resultados muy variados (teorema del límite central), lo que implica que, aunque se tomen más muestras, sus resultados no varían.

Los componentes orgánicos (materia orgánica altamente putrescible MOP) que presentan normalidad en las muestras son 5: cítricos, choclo, comida preparada, cáscara de plátano verde y otros. Los componentes inorgánicos y orgánicos con baja putrescibilidad, también son 5: plástico, papel y cartón, vidrio, madera y residuos de plantas, y otros.

Los 10 componentes antes mencionados (del total de 26) representan más del 80% de la masa ponderada de las muestras representativas del relleno sanitario de Guayaquil.

También se analizaron las funciones de probabilidad de las variables. Se encontraron desviaciones estándar altas en la gran mayoría de los componentes, así como amplitudes en la mayoría de los casos (no normales) muy reducidas por su gran estacionalidad (Anexo 4).

Cuadro 25 Intervalo de confianza (al 90%, 95% y 99%) para la media de los componentes de la materia orgánica putrescible, año 2016.

INTERVALO DE CONFIANZA PARA LA MEDIA	Lower 90	Lower 95	Lower 99	Mean	Upper 90	Upper 95	Upper 99
ORGANICOS							
CITRICOS	10,97	10,62	9,93	12,73	14,50	14,85	15,54
CHOCLO	7,07	6,83	6,34	8,31	9,55	9,79	10,28
COMIDA_PREPARADA	18,72	18,25	17,32	21,09	23,46	23,93	24,86
RESTOS_DE_JARDINERIA	5,79	5,40	4,61	7,79	9,79	10,18	10,97
CASCARA_DE_PLATANO_VERDE	21,76	21,32	20,44	23,99	26,23	26,67	27,55
GUABA	0,44	0,37	0,23	0,80	1,15	1,22	1,36
CANGREJO	0,04	-0,05	-0,23	0,51	0,97	1,06	1,25
CULANTRO	1,53	1,41	1,18	2,13	2,73	2,85	3,08
COCO	3,23	2,95	2,40	4,64	6,04	6,32	6,87
CONCHA	0,05	-0,02	-0,17	0,42	0,80	0,87	1,02
SANDÍA	1,32	1,21	0,98	1,90	2,47	2,58	2,81
MARACUYÁ	0,36	0,28	0,12	0,76	1,16	1,24	1,39
LECHUGA	0,51	0,40	0,17	1,07	1,64	1,75	1,97
PIÑA	0,35	0,27	0,12	0,72	1,10	1,18	1,33
MANGO	0,02	-0,05	-0,20	0,41	0,79	0,87	1,02
YUCA	1,47	1,34	1,08	2,13	2,79	2,92	3,18
ZAPALLO	0,52	0,38	0,11	1,23	1,94	2,08	2,36
OTROS	7,80	7,49	6,87	9,36	10,93	11,24	11,86

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la variabilidad de los componentes, se calcularon los valores para intervalos de confianza al 99%, 95% y 90%, en los cuales se aprecia que se obtienen valores con gran variabilidad principalmente entre los orgánicos (MOP).

Cuadro 26 Intervalo de confianza (al 90%, 95% y 99%) para la media de los componentes de la materia no putrescible, año 2016.

INTERVALO DE CONFIANZA PARA LA MEDIA	Lower 90	Lower 95	Lower 99	Mean	Upper 90	Upper 95	Upper 99
NO PUTRESCIBLE							
PLASTICOS..	13,46	13,28	12,94	14,34	15,22	15,40	15,74
PAPEL.Y.CARTON..	7,90	7,74	7,42	8,71	9,52	9,68	9,99
VIDRIO..	2,63	2,55	2,39	3,04	3,45	3,53	3,69
METAL..	1,37	1,32	1,20	1,66	1,95	2,01	2,12
CAUCHO..	0,84	0,78	0,66	1,16	1,48	1,54	1,67
MADERA.Y.RESIDUOS.DE.PLANT	2,56	2,43	2,18	3,21	3,85	3,98	4,23
TIERRA..PIEDRAS..MAT.CONST...	1,43	1,33	1,15	1,90	2,38	2,47	2,66
OTROS..pañales..tela..cuero..etc	6,90	6,78	6,54	7,49	8,09	8,21	8,45

Dado que en el año 2016 se tiene la información completa de los componentes de los RSU y no varía significativamente con los resultados de los años 2012 y 2017, se toma este año como representativo para el resto del análisis.

4.1.3 Clasificación de materiales absorbentes

Considerando que los RSU contienen materiales absorbentes que pueden retener los líquidos generados por la MOP, se clasificaron de igual forma los derivados de papel y cartón para cada estrato socioeconómico.

En promedio, en el estrato bajo, el cartón ocupa el 35,3% de la composición del papel, seguido por el papel periódico con el 29% y el papel higiénico con el 22,2%. En el estrato socioeconómico medio bajo, en promedio el cartón representa el 32,8% del papel, seguido del papel higiénico y papel periódico con el 29,5 y 19,1% respectivamente. Para el nivel socioeconómico medio, en promedio el tipo de papel que ocupa el mayor porcentaje es el cartón, seguido de papel higiénico y papel periódico con porcentajes de 38,7%, 22,9% y 16,8% respectivamente. En promedio, en el sector medio alto, el 46% del papel es cartón, el 24,3% es papel higiénico y el 14,6% es papel periódico. En el sector alto, en promedio el 38,4% le corresponde a papel periódico, el 29,7% a cartón y el 20% a papel higiénico (Figura 24).

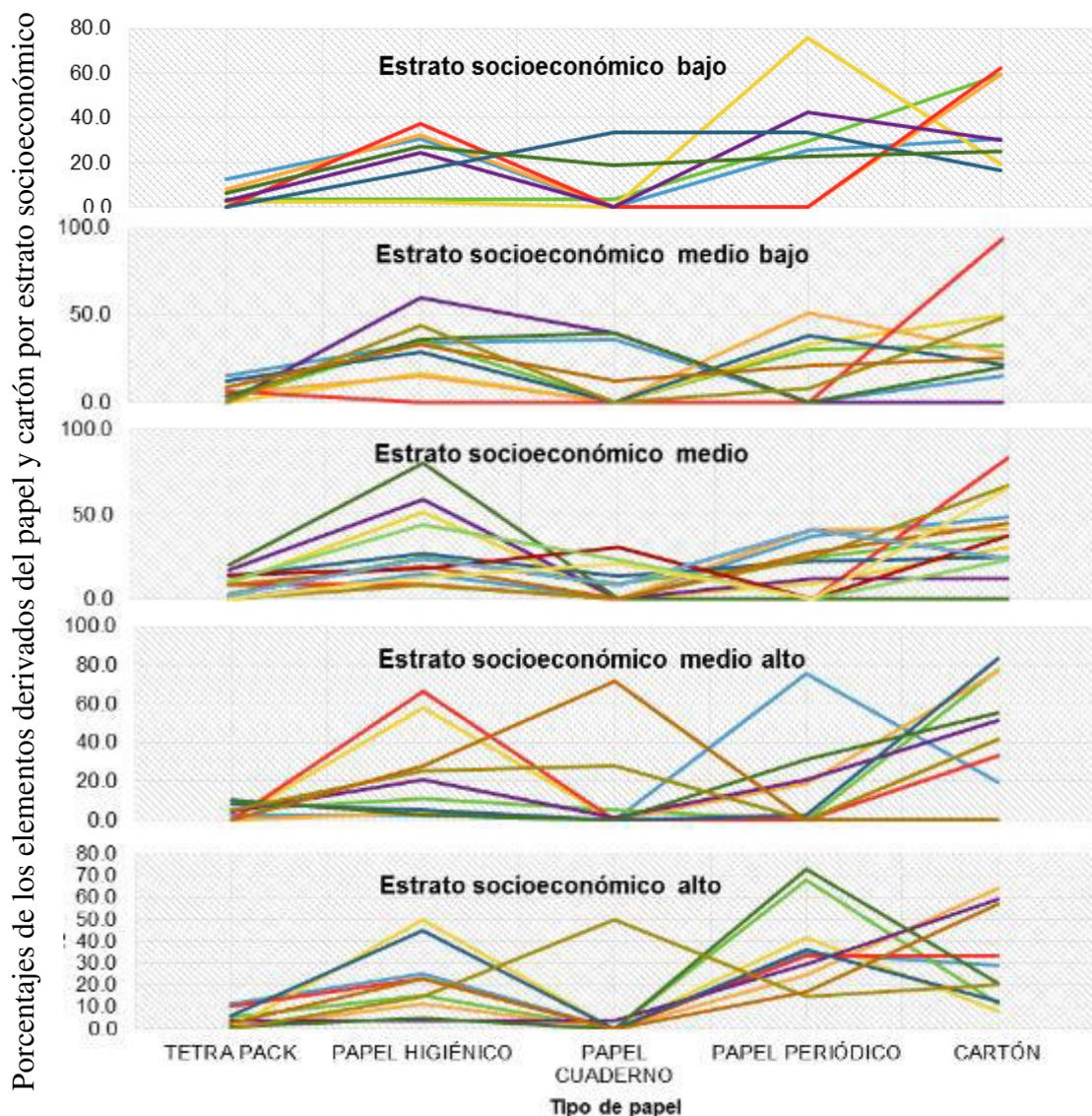


Figura 24. Composición del papel en los estratos socioeconómicos

En el Cuadro 27 y en la Figura 25, se presentan los porcentajes promedio de los componentes de los materiales absorbentes por estrato socioeconómico.

Cuadro 27. Composición del material absorbente en función de sectores por niveles económicos

	PROMEDIOS (PORCENTAJES)				
	BAJO	MEDIO BAJO	MEDIO	MEDIO ALTO	ALTO
TETRA PACK	4,3	5,4	7,4	4,0	4,3
PAPEL HIGIÉNICO	22,2	29,5	22,9	24,3	20,0
PAPEL CUADERNO	9,1	13,2	14,2	11,2	7,6
PAPEL PERIÓDICO	29,0	19,1	16,8	14,6	38,4
CARTÓN	35,3	32,8	38,7	46,0	29,7

Fuente: Elaboración propia

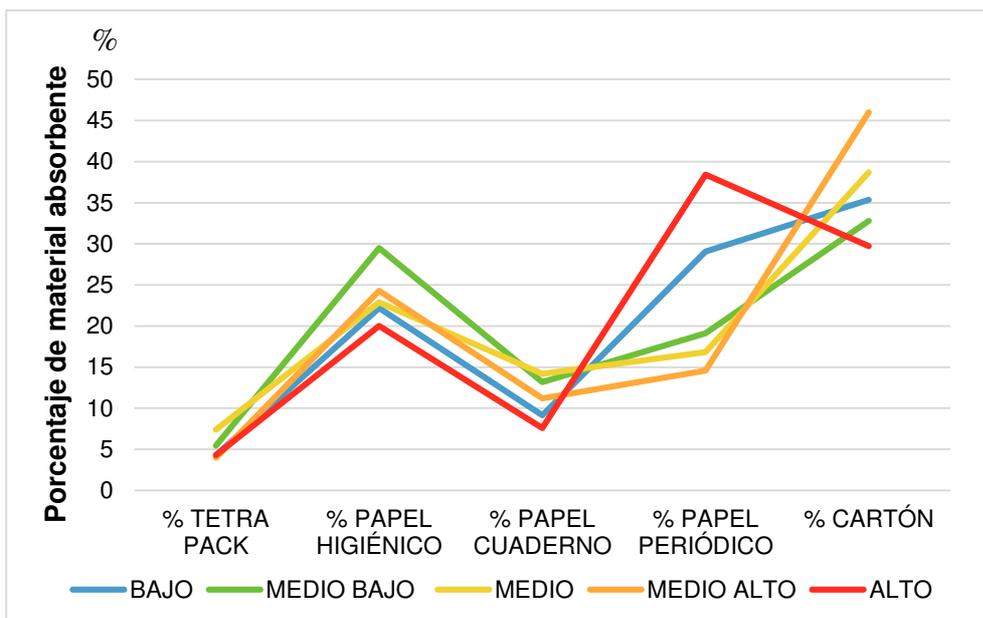


Figura 25. Composición del material absorbente en función de sectores por niveles económicos

En un promedio ponderado de todos los sectores socioeconómicos, el mayor porcentaje de tipo de papel lo ocupa el cartón (36,5%), seguido del papel higiénico (23,85%) y el papel periódico (23,1%) (Figura 26).

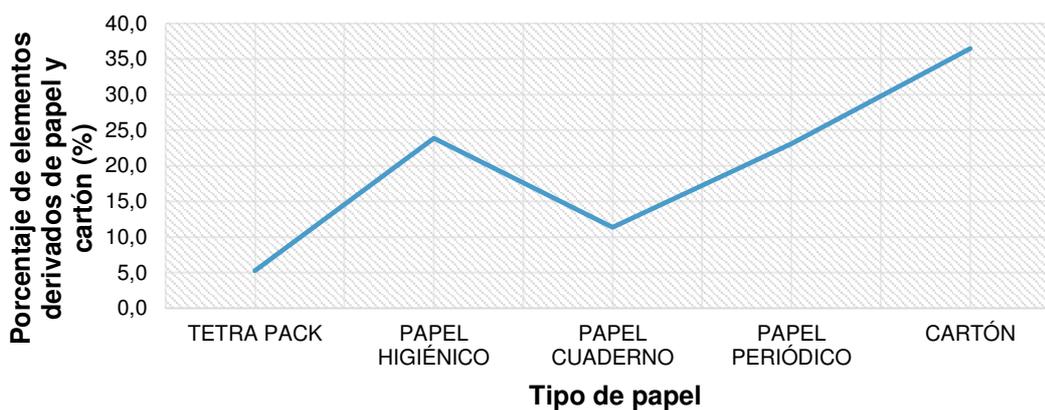


Figura 26. Promedio ponderado de composición del papel de los RSU de Guayaquil (todos los sectores socioeconómicos)

Para cuantificar la capacidad de absorción de líquidos de los materiales derivados del papel y cartón, se realizaron tres ensayos de absorción en cada tipo de material utilizando muestras de 200 ml de agua, con el método por desecación (TOTAL SOLID DRIED 2540B STANDARD METHODS). Para

determinar el nivel máximo de absorción que se da entre los materiales llamados absorbentes, se hizo un análisis con condiciones ambientales de Guayaquil, saturándolos para luego pesarlos y conocer el máximo nivel de absorción (Cuadro 28).

Cuadro 28. Absorción en materiales derivados de papel y cartón

Papel Toalla	Masa Inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia (gr)	
	1,0537	8,5390	7,4853	
	1,0518	9,6995	8,6477	
	1,0526	9,4582	8,4056	absorción promedio
Promedio	1,0527	9,2322	8,1795	7,8
Cartón	Masa Inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia (gr)	
	1,6005	4,6910	3,0905	
	1,6891	5,0264	3,3373	
	1,7456	4,1048	2,3592	absorción promedio
Promedio	1,6784	4,6074	2,9290	1,7
Papel Bond	Masa Inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia (gr)	
	1,0691	2,3501	1,2810	
	1,0111	2,2351	1,2240	
	1,0717	3,1751	2,1034	absorción promedio
Promedio	1,0506	2,5868	1,5361	1,5
Servilleta	Masa Inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia (gr)	
	10	71,8	61,8000	
	9,9	74,6	64,7000	
	10	73,5	63,5000	absorción promedio
Promedio	10,0	73,3	63,3333	6,4
Periódico	Masa Inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia (gr)	
	11	35,6	24,6000	
	10,4	35,5	25,1000	
	11,2	42,5	31,3000	absorción promedio
Promedio	10,9	37,9	27,0000	2,5
Papel Bond	Masa Inicial (gr)	Masa final (gr)	Diferencia (gr)	
	11	26,1	15,1000	
	11	22,9	11,9000	
	11,1	25,7	14,6000	absorción promedio
Promedio	11,0	24,9	13,8667	1,3

Fuente: von Buchwald (2017)

Para determinar la capacidad de absorción, se hizo un análisis ponderado por estrato socioeconómico de los materiales absorbentes, relacionado con la proporción de papel y cartón que tienen los RSU de Guayaquil, en este caso

8.7% (año 2016). Esto resulta en 45.9 Kg/t de potencial capacidad absorbida (Cuadro 29), considerando que los derivados de papel y cartón llegan saturados al relleno, producto de la mezcla con componentes orgánicos en proceso de descomposición. Eso significa que el peso seco de los derivados de papel y cartón es 41.37 Kg/t siendo su peso húmedo al hacer la caracterización 87.27 Kg/t (8.7%).

Cuadro 29. Cantidad de agua que puede retener el material absorbente en 1 tonelada de basura

CARACTERIZACION 2016		CAPACIDAD DE ABSORCION (número de veces en masa)	PESO SECO (Kg/t)	POTENCIAL CAPACIDAD ABSORBIDA (Kg/t)
COMPONENTE	PROMEDIO PONDERADO PESO HÚMEDO (Kg/t)			
TETRA PACK (Kg/t)	4,63	1,00	4,63	0,00
PAPEL HIGIÉNICO (Kg/t)	21,02	7,10	2,96	18,06
PAPEL CUADERNO (Kg/t)	10,01	1,40	7,15	2,86
PAPEL PERIÓDICO (Kg/t)	19,80	2,50	7,92	11,88
CARTÓN (Kg/t)	31,82	1,70	18,72	13,10
SUMA	87,27		41,37	45,90

Fuente: Elaboración propia

Otra condición física a considerarse es la capacidad de adsorción de los componentes, para tal efecto se realizaron ensayos de laboratorio saturando las muestras con lixiviado a 50°C (ver Cuadro 30), las que se mantuvieron en un horno (en un proceso aerobio) a dicha temperatura hasta que la masa fuera constante, luego se las mantuvo en el horno sin la influencia de la saturación por lixiviados hasta que se obtuvo la masa mínima de cada uno de los componentes, obteniendo de esta forma el nivel máximo combinado de absorción y adsorción.

Cuadro 30 Nivel de adsorción de los componentes medido en kg/t de RSU

Material	*M.I.	**Masa húmeda	***M.S.	M.S. - M.I.	% Adsorc.	% Adsorc. prom.	%/t RSU	kg/t	Adsorc. (kg/t)
PLASTICO	1.30	1.80	1.40	0.10	7.69	6.98	14.29	142.90	9.97
	1.80	2.60	1.90	0.10	5.56				
	1.30	1.90	1.40	0.10	7.69				
METAL	60.80	61.50	60.90	0.10	0.16	0.19	1.67	16.73	0.03
	90.80	93.20	90.90	0.10	0.11				
	33.00	33.60	33.10	0.10	0.30				
CAUCHO	12.90	13.40	13.00	0.10	0.78	0.72	1.18	11.77	0.08
	13.40	14.50	13.50	0.10	0.75				
	15.70	17.60	15.80	0.10	0.64				
PIEDRA	20.10	21.20	20.50	0.40	1.99	1.82	1.92	19.24	0.35
	16.60	17.50	17.00	0.40	2.41				
	18.90	19.60	19.10	0.20	1.06				
TIERRA (ARCILLA)	16.40	27.80	20.60	4.20	25.61	27.03	0.00	0.00	0.00
	16.30	26.50	20.70	4.40	26.99				
	16.50	28.90	21.20	4.70	28.48				
VIDRIO	18.90	19.20	19.00	0.10	0.53	0.73	3.07	30.73	0.22
	23.10	23.80	23.20	0.10	0.43				
	16.40	17.00	16.60	0.20	1.22				
PAPEL HIGIÉNICO	110.10	991.20	116.60	6.50	5.90	5.78	2.08	20.81	1.20
	111.50	1,002.70	116.20	4.70	4.22				
	110.80	996.70	118.80	8.00	7.22				
PAPEL PERIÓDICO	120.00	420.20	124.10	4.10	3.42	4.38	2.02	20.15	0.88
	120.50	421.80	126.40	5.90	4.90				
	120.30	421.10	126.10	5.80	4.82				
PAPEL BOND	110.10	253.20	117.70	7.60	6.90	7.12	0.99	9.89	0.70
	110.50	257.20	118.50	8.00	7.24				
	111.00	259.50	119.00	8.00	7.21				
CARTÓN	115.00	310.80	121.60	6.60	5.74	5.05	3.18	31.83	1.61
	113.00	305.00	118.00	5.00	4.42				
	118.00	318.00	123.90	5.90	5.00				
Capacidad de adsorción en kg/t RSU									15.06
*Masa Inicial en condiciones ambientales de Guayaquil									
**Masa húmeda máxima saturada con lixiviado, medido una vez escurrido en horno a 50°C.									
***Masa seca estabilizada a 50°C una vez saturada.									

Fuente: Elaboración propia

Esto demuestra que el nivel de adsorción de los componentes que constituyen los RSU es de 15 Kg/t, el mismo que está incorporado en los componentes cuando se hizo la caracterización, por haberse calculado con el peso húmedo al llegar al relleno sanitario.

4.1.4 Producción de lixiviados

Para analizar las producciones de lixiviados se corrió el Método HELP, obteniéndose como resultado que las producciones de los cinco primeros

años son cero, y en el resumen final mencionan una producción de 163.38 pies cúbicos por hectárea (4.62 m³/Ha) durante los cinco años, valor que relacionado para una capa de RSU de 4.40 m de altura, con una densidad de 1 Ton /m³, resulta $4.62 \text{ m}^3 / (4.40 \times 10000 \text{ t}) = 0.000105 \text{ m}^3/\text{t}$, es decir no produce lixiviados (Anexo 9).

También se corrió el método de Tchobanoglous, cuyo desarrollo se publicó (por motivo de esta investigación) en la Revista de la Facultad de Ingeniería Geológica de la UNMSM (von Buchwald & Martínez, 2018)

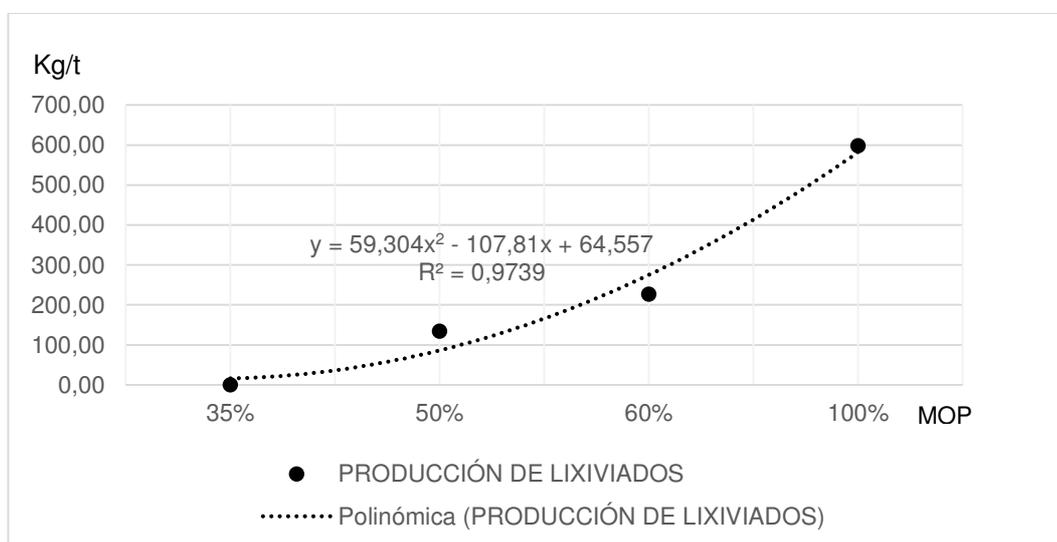


Figura 27 Curva de producción de lixiviados en función del contenido de MOP desarrollado con el método Tchobanoglous.

Desarrollando la curva de Tchobanoglous se pudo determinar que los valores de producción cero se dan cuando el porcentaje de materia orgánica putrescible es el 35% y los valores máximos con el 100% de MOP producen 598 kg por tonelada. (Ver Figura 27)

4.1.4.1 Laboratorio

Para determinar el potencial contenido de lixiviados, se implementó el método generalmente utilizado: "TOTAL SOLID DRIED 2540B SM (STANDARD METHODS)", (Standard Methods for the examination of water and

wastewater, 2005) cuyo proceso corresponde a un sistema de “deseccación” a 103°C de temperatura, en una estufa hasta conseguir un masa constante, cuya diferencia de masas inicial y final, determina la pérdida total de peso, considerada como “humedad total” aunque en este método no se separan los valores de los líquidos, vapor, gases volátiles, etc., de la materia orgánica de cada uno de los materiales analizados.

En el Cuadro 31, se presenta la pérdida total de masa por desecación (Kg/t) que tienen los residuos con la composición del RS de Guayaquil. Se destaca que el 47.20% de la masa total, se pierde por desecación (48.81% utilizando solo componentes normalizados). Con estos resultados, se puede desglosar que el 79.8% de la materia orgánica se pierde por desecación (46.61% ÷ 58.42%) (82.35% con componentes normalizados); en el caso de la materia inorgánica es el 1.40% (0.58% ÷ 41.58%) (1.6% para componentes normalizados). Por estos resultados, se considera que la generación de lixiviados está relacionada (solo) con la materia orgánica putrescible.

Cuadro 31. Pérdida de masa en los RSU con el método de desecación

	COMPONENTE	% CARACTERIZACION PROMEDIO PONDERADO	PERDIDA DE MASA POR DESECACION(%)	PERDIDA DE MASA (Kg/t) TODOS LOS COMPONENTES	PROMEDIO PONDERADO COMPONENTES NORMALIZADOS	PERDIDA DE MASA (Kg/t) COMPONENTES NORMALIZADOS
	% CÍTRICOS	7,44	86,10	64,05	9,85	84,84
	% CHOCLO	4,86	71,67	34,80	6,43	46,10
	% COMIDA PREPARADA	12,32	73,15	90,13	16,32	119,38
	% RESTOS DE JARDINERÍA	4,55	67,40	30,67	-	-
	% CÁSCARA DE PLÁTANO VERDE	14,02	88,18	123,61	18,57	163,73
	% GUABA	0,47	60,47	2,82	-	-
	% CANGREJO	0,30	1,00	0,03	-	-
	% CULANTRO	1,24	92,28	11,48	-	-
	% COCO	2,71	61,21	16,58	-	-
	% CONCHA	0,25	1,05	0,03	-	-
	% SANDÍA	1,11	94,57	10,48	-	-
	% MARACUYÁ	0,44	84,71	3,75	-	-
	% LECHUGA	0,63	95,58	5,99	-	-
	% PIÑA	0,42	77,39	3,28	-	-
	% MANGO	0,24	70,68	1,68	-	-
	% YUCA	1,25	82,09	10,22	-	-
	% ZAPALLO	0,72	81,84	5,90	-	-
	% OTROS (NO SE PUEDE SEPARAR)	5,47	92,56	50,64	7,25	67,08
	TOTAL PARCIAL (ORGÁNICOS) (Kg/t RSU)	58,42	Sub-total	466,13	58,42	481,13
% PROMEDIO PONDERADO MATERIAL DE BAJA PUTRESCIBILIDAD E INORGÁNICOS	% PAPEL / CARTÓN	8,73	3,00	2,62	10,18	3,05
	% PLÁSTICOS	14,29	0,18	0,26	16,66	0,30
	% VIDRIO	3,07	-	-	-	-
	% METAL	1,67	0,07	0,01	-	-
	% CAUCHO	1,18	0,64	0,08	-	-
	% MADERA Y RESIDUOS DE PLANTAS	3,24	1,36	0,44	3,77	0,51
	% PIEDRA	1,92	1,04	0,20	2,24	0,23
% OTROS (PAÑALES, TELA, CUERO, ETC)	7,48	3,00	2,24	8,72	2,62	
	TOTAL PARCIAL (ORGÁNICOS CON BAJA PUTRESCIBILIDAD + INORGÁNICOS) (Kg/t RSU)	41,58	Sub-total	5,85	41,58	6,72
	TOTAL PERDIDA DE MASA POR DESECACIÓN (Kg/t RSU)			471,98		487,85

Fuente: Elaboración propia

Dado que el análisis anterior por desecación, no se ajusta totalmente a las condiciones de un relleno sanitario (condición inicial aerobia, luego anaerobia, con temperatura de alrededor de 50°C), y sus resultados no discriminan los valores de pérdida por volatilización, evaporación, licuación, ni lixiviados, se procedió a desarrollar un método (nuevo) no normalizado para determinar la cantidad real de lixiviados producido en condiciones de relleno sanitario. A este se lo denominó Método gravimétrico por filtración en condiciones de relleno sanitario (MGFRS) medido en medios aerobio y anaerobio, cuyo procedimiento se presenta en un cuadro comparativo con el método 2540B SM (desecación) demostrando la diferencia en los procedimientos (ver Cuadro 32).

Cuadro 32 Comparativo de métodos de laboratorio para lixiviación

MÉTODO DE LIXIVIACIÓN	TOTAL SOLID DRIED 2540B STANDARD METHODS	MÉTODO GRAVIMÉTRICO POR FILTRACIÓN EN CONDICIÓN DE RELLENO SANITARIO - MGFRS	
	DESECACION 103°C	MGFRS ANAEROBIO 50°C	MGFRS AEROBIO 50°C
EQUIPO	Estufa regulada a 103±2°C	Incubadora	Incubadora
MEDIO	Aerobio	Anaerobio	Aerobio
TEMPERATURA	103°C	50°C	50°C
CONTENEDORES DE LA MUESTRA	Cápsulas porcelana/ platillo metálico.	Embudos filtrantes magnéticos de Polyether sulfone (PES) de vollumen de 500 ml con tapa. Tamaño de poro 1µm.	Embudos filtrantes magnéticos de Polyether sulfone (PES) volumen de 500 ml sin tapa. Tamaño de poro 1µm.
HUMEDAD	Se evapora totalmente no existe formación de lixiviado.	Se precipita (se recibe el lixiviado en vasos de precipitación de 250 ml).	Se evapora y precipita (se recibe el lixiviado en vasos de precipitación de 250 ml).
SOPORTE	No aplica.	Soporte metálico para cada embudo filtrante.	Soporte metálico para cada embudo filtrante.
TIEMPO	24 horas hasta masa constante.	1-50 días hasta no observar cambio en la masa de la muestra ni presencia de lixiviado.	1-7 días hasta no observar cambio en la masa de la muestra y presencia de lixiviado.
CANTIDAD DE MUESTRA	Se utiliza cantidades pequeñas de muestra.	Se utiliza aproximadamente el 80 - 90% del volumen del embudo filtrante.	Se utiliza aproximadamente el 80-90% del volumen del embudo filtrante.

Fuente: Elaboración propia

Para realizar la comparación entre el método de desecación y los métodos gravimétricos por filtración, MGFRS (aerobio y anaerobio), las muestras de los 18 componentes de la materia orgánica putrescible se dividieron en 9 partes, 3 repeticiones para cada método, cuyos resultados se encuentran en el Anexo 3, validando la hipótesis nula en la que sus resultados son iguales a la media aritmética, y la hipótesis alterna, que no lo son en un intervalo de confianza del 95%; (ver detalle en sección 4.2 Hipótesis Nula). En las Figuras 28, 29 y 30, se muestran las curvas de producción de lixiviados por el MGFRS (anaerobia) de los componentes más significativos (58% de la MOP): cáscara de plátano verde, comida preparada y cítricos, se puede apreciar que en 30 días se desarrolla toda su evolución. Los picos aparecen en menos de 15 días.

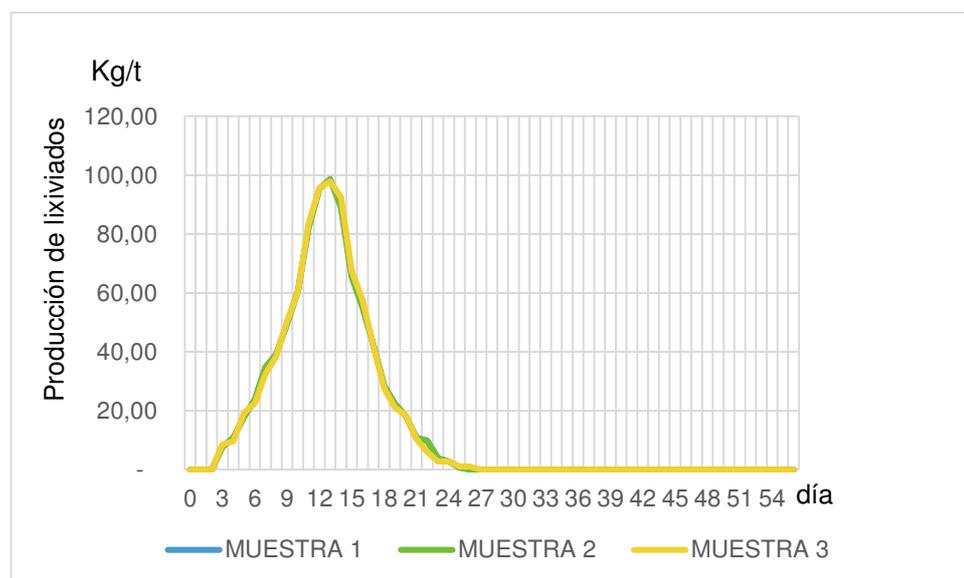


Figura 28 Producción de lixiviados en residuos de plátano verde con método MGFRS anaerobio (método propio).

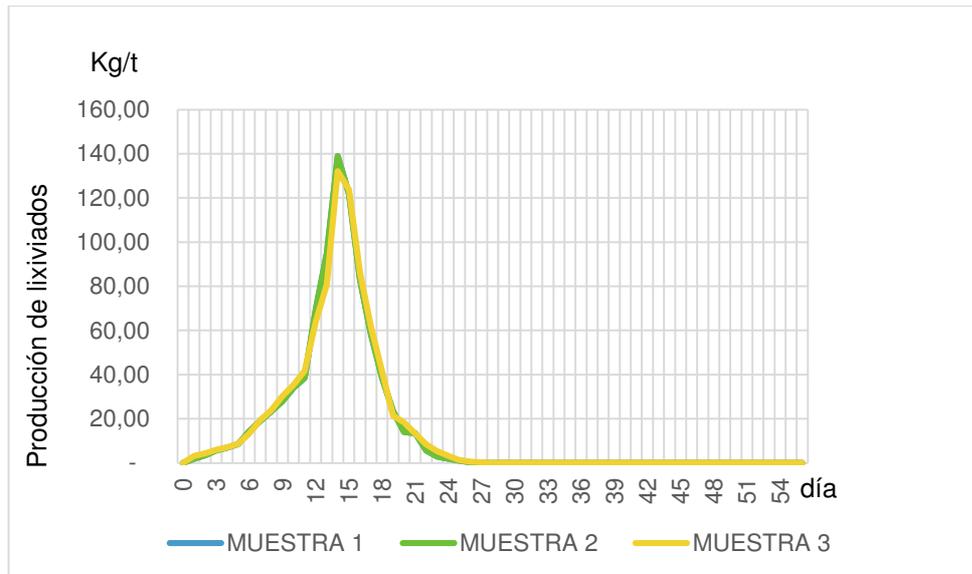


Figura 29 Producción de lixiviados en residuos de cítricos (naranja) con método MGFRS anaerobio (método propio).

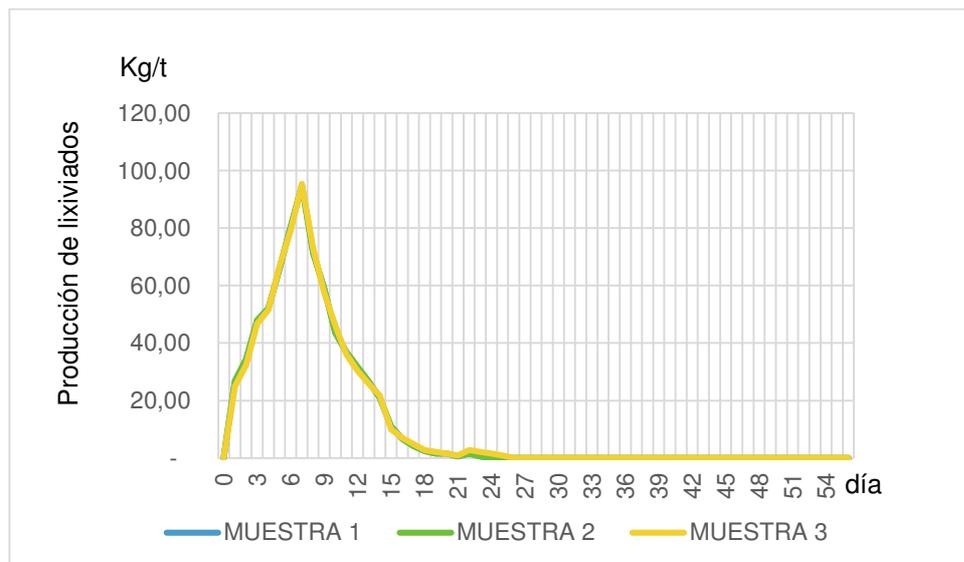


Figura 30 Producción de lixiviados en residuos de comida preparada con método MGFRS anaerobio (método propio).

La producción de lixiviados de estos componentes convergen a una distribución Gaussiana, para validar los resultados obtenidos bajo el supuesto de normalidad, planteamos una prueba de hipótesis estadística para la media al 95% de confianza, donde la hipótesis nula planteada, es que la media (μ) es igual a un valor (μ_0) y la hipótesis alterna es diferente a μ_0 .

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

Para un nivel de confianza del 95%, $Z < 1.96$.

Estadístico de la prueba: $(\bar{X} - \mu) / (\sigma_{\bar{X}} / \sqrt{N})$

\bar{X} = media aritmética

μ = dato a analizar

$\sigma_{\bar{X}}$ = desviación estándar

N = número

Si el estadístico de la prueba es menor que 1.96, se acepta la hipótesis nula.

En el laboratorio, se realizaron ensayos por triplicado y fueron validados, con lo cual se aceptó la prueba de hipótesis en todos los casos (Anexo 3).

La Figura 31 muestra la integración de los resultados de generación diaria de lixiviados (método MGFRS-anaerobio; método propio) de cada uno de los componentes orgánicos putrescibles que constituyen la composición de los RSU de Guayaquil, los que individualmente (al 100%) demuestran que los de mayor generación de lixiviados son restos de: coco, yuca y naranja. Al aplicar el peso ponderado de cada componente para el 58.42% de MOP, se observa que el pico del promedio ponderado ocurre el día 12, con un valor de 40.30 Kg/t, y al cabo 25 días el proceso de lixiviación se hace marginal.

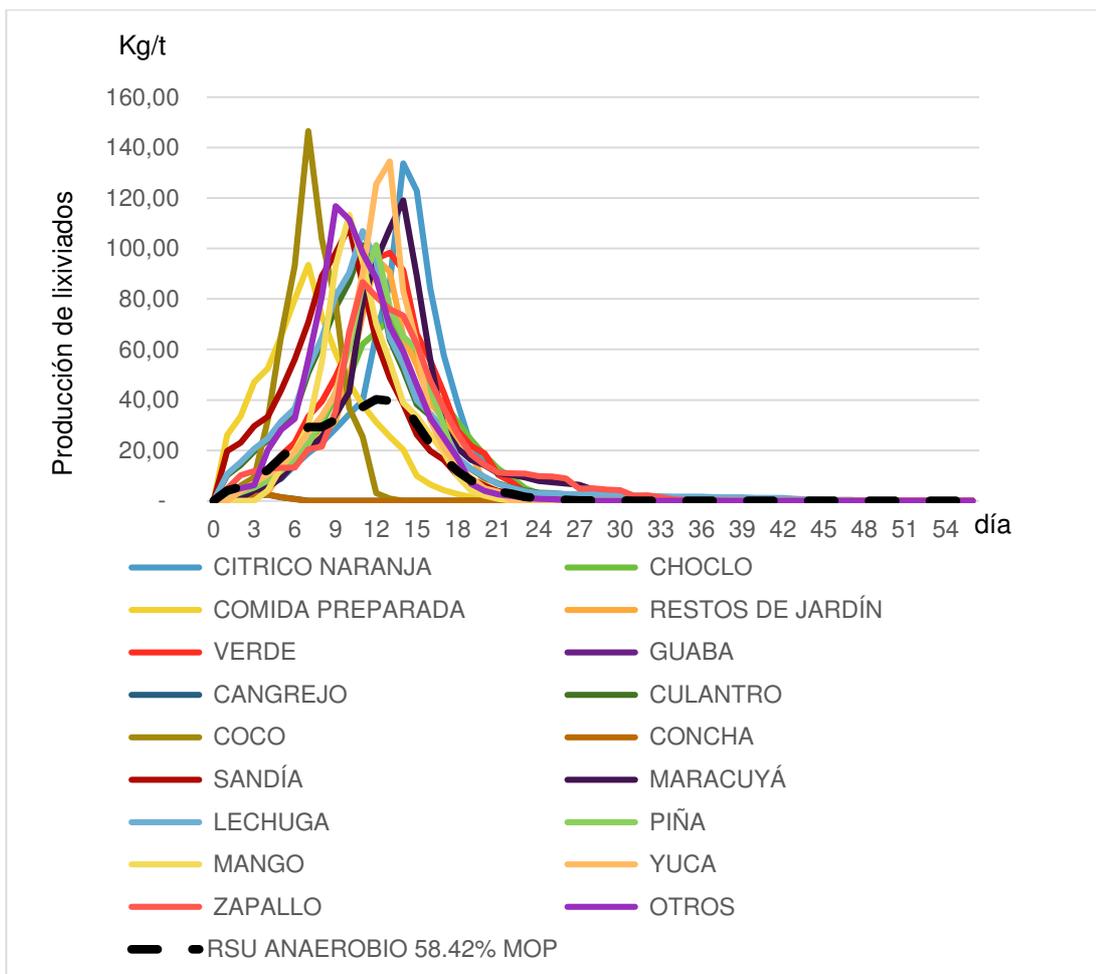


Figura 31 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio anaerobio.

La Figura 32 muestra los resultados de generación acumulada de lixiviados, que se presentaron en la Figura 31, cuyo coeficiente de determinación (R^2) es muy cercano a 1, lo que determina que la ecuación es una buena representación de la relación entre las variables de producción de lixiviados vs tiempo. Se observa que, a partir del día 25, se hace asintótica, con valores mínimos. El nivel máximo acumulado es 456.09 kg de lixiviados por tonelada de RSU (ver Anexo 3), valor que se mantiene constante a lo largo del tiempo siempre y cuando el ingreso de la cantidad de toneladas sea el mismo.

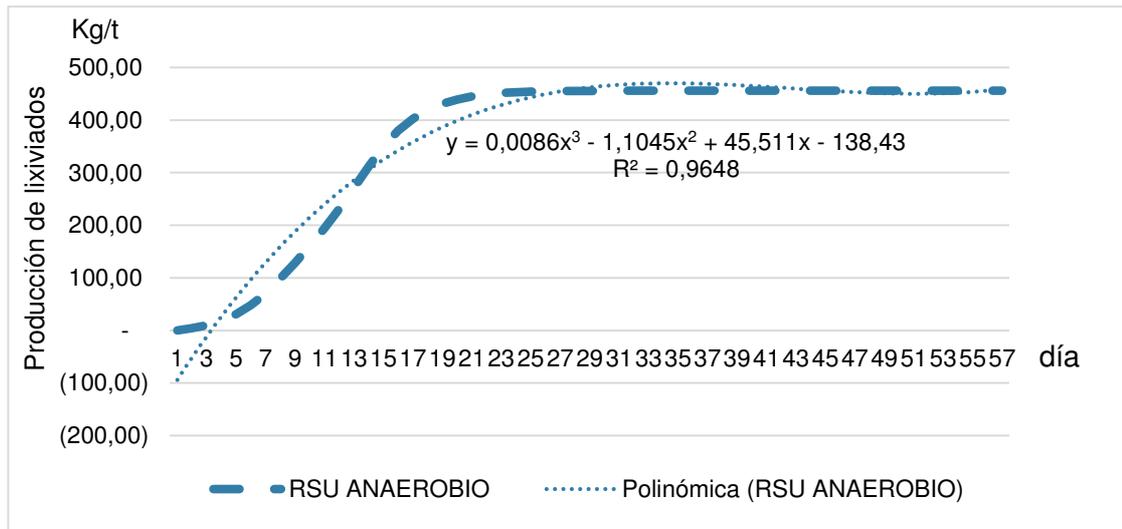


Figura 32 Producción diaria acumulada de lixiviados de RSU con método MGFRS (método propio) medio anaerobio.

La Figura 33 muestra la integración de los resultados de generación diaria de lixiviados (método MGFRS-aerobio; método propio) de cada uno de los componentes orgánicos putrescibles que constituyen la composición de los RSU de Guayaquil (orgánicos e inorgánicos), los que individualmente (al 100%) demuestran que los de mayor generación de lixiviados son restos de: sandía, culantro y plátano verde. Al aplicar el peso ponderado de cada componente para el 58.42% de MOP, se observa que el pico ocurre en el primer día, con un valor de 44.98 Kg/t., y al cabo de 5 días el proceso de lixiviación se hace marginal.

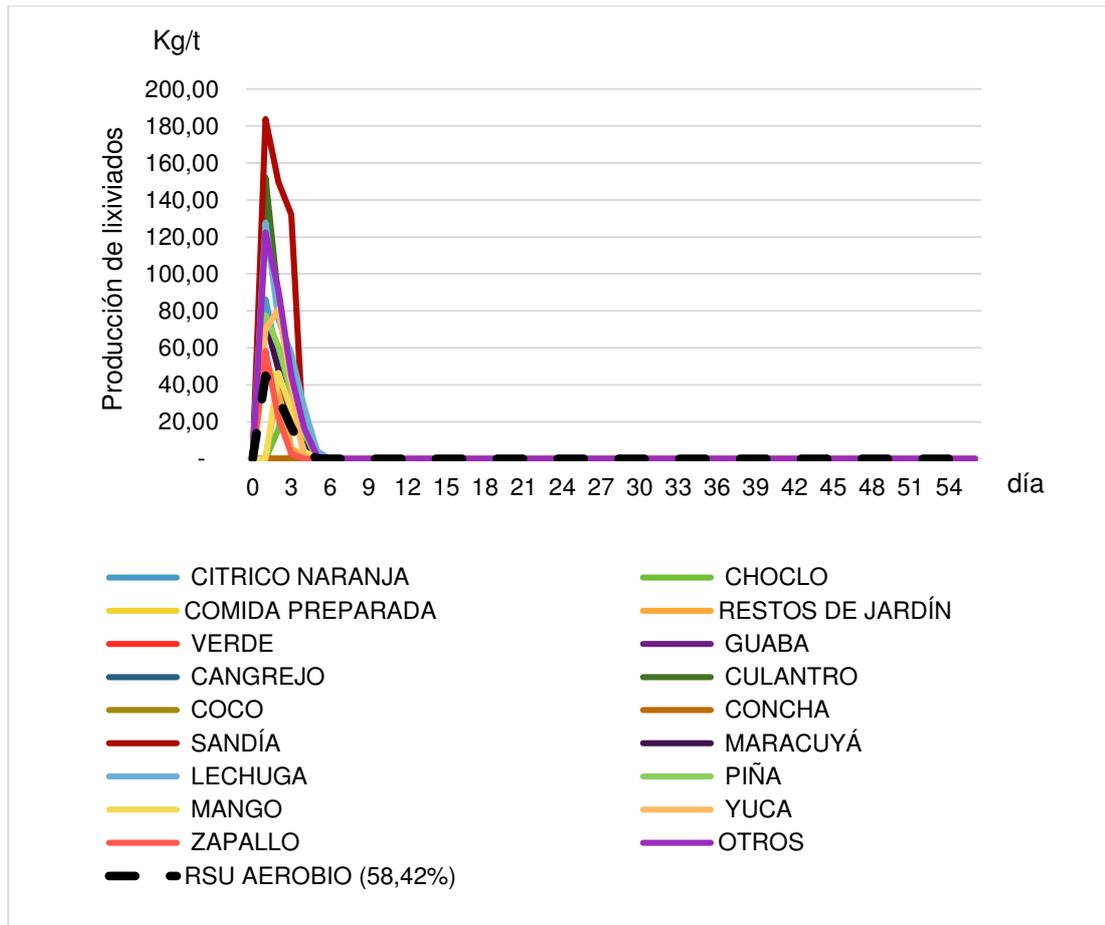


Figura 33 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio aerobio.

La Figura 34 muestra los resultados de generación acumulada de lixiviados, que se presentaron en la Figura 33, cuyo coeficiente de determinación (R^2) tiene también un valor cercano a uno. Se observa que, a partir del quinto día, se hace asintótica. El nivel máximo acumulado es 98.84 kg de lixiviados por tonelada de RSU (ver Anexo 3), valor que se mantiene constante a lo largo del tiempo siempre y cuando el ingreso de la cantidad de toneladas sea el mismo.

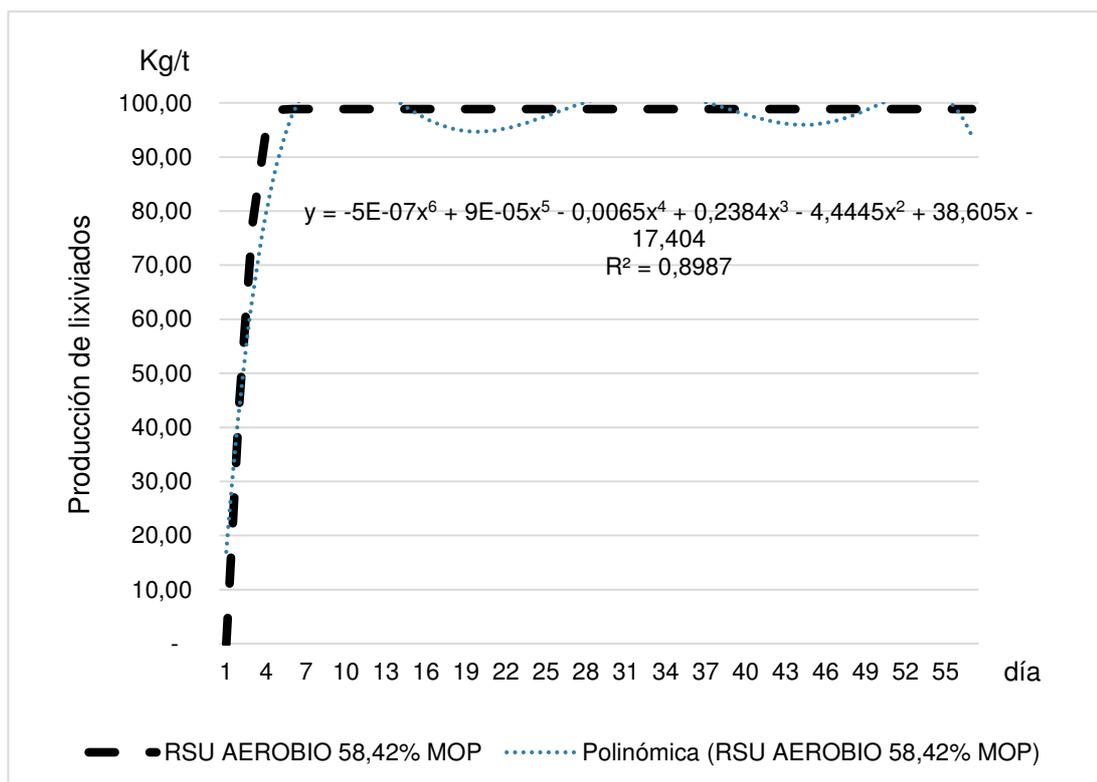


Figura 34 Producción diaria acumulada de lixiviados de RSU con método MGFRS (método propio) medio aerobio.

En el Cuadro 33, se presenta la pérdida máxima de masa obtenida con el método por desecación en laboratorio, con un resultado de 466.13 Kg/t (46.6% del 58.42%), es decir, se pierde el 79,8% de la materia orgánica putrescible. Con el método gravimétrico por filtración en relleno sanitario (MGFRS; método propio), con la composición de residuos sólidos del RS de Guayaquil, en medio anaerobio, la generación de lixiviado es 456.23 Kg/t (45.6 % del 58.42%), es decir, el 78%. Con el mismo método (MGFRS; método propio) en medio aerobio, la generación de lixiviado es de 98.84 Kg/t (9.9% del 58.42%), es decir, el 17%. La diferencia entre los lixiviados producidos en proceso anaerobio menos la producción de lixiviados del proceso aerobio, corresponde al vapor que se licúa 16% (78%-17%). Lo rescatable de estos 3 métodos es que los valores de masa remanentes, una vez terminado el proceso de desecación y de filtración, son prácticamente iguales (11.8%, 12.1% y 12.4%), o (11.8 del 58.42%) 20%, 21% y 21% de la MOP, y no hay más descomposición de la materia orgánica.

La evolución de la pérdida de líquidos no toma más de 45 días en el proceso anaerobio, y 5 días en el proceso aerobio. Como investigación adicional se compararon los resultados de MGFRS a 35°C (temperatura máxima a la que llegan los RSU al relleno sanitario) y 50°C (temperatura máxima al interior del relleno sanitario) para los componentes orgánicos, encontrándose que los porcentajes de masa remanente y de producción de lixiviados son similares (ver Anexo 3), lo que significa que el periodo de descomposición aerobia se inicia en las residencias y su proceso continúa hasta que se deposita en el relleno sanitario o botadero (según sea el caso), esta pérdida de peso por evaporación y producción de lixiviados, generalmente no se contabiliza, o se contabiliza parcialmente.

Cuadro 33 Generación de lixiviados en RSU con métodos de desecación y MGFRS en condiciones anaerobia y aerobia.

MATERIA ORGÁNICA	CARACTERIZACIÓN (%)	DESECACIÓN		MGFRS AEROBIO		MGFRS ANAEROBIO	
		PERDIDA DE MASA POR DESECACIÓN (%)	PÉRDIDA DE MASA POR DESECACIÓN (Kg/t)	LIXIVIADO (%)	LIXIVIADO (Kg/t)	LIXIVIADO (%)	LIXIVIADO (Kg/t)
CITRICOS	7,44	86,10	64,05	17,20	12,795	84,19	62,63
CHOCLO	4,86	71,67	34,80	6,86	3,332	69,95	33,97
COMIDA PREPARADA	12,32	73,15	90,13	9,27	11,428	72,22	88,98
RESTOS JARDIN	4,55	67,40	30,67	4,68	2,131	67,06	30,52
PLATANO VERDE	14,02	88,18	123,61	27,52	38,582	87,00	121,96
GUABA	0,47	60,47	2,82	-	-	3,05	0,14
CANGREGO	0,30	1,00	0,03	-	-	0,83	0,02
CULANTRO	1,24	92,28	11,48	30,25	3,763	89,35	11,12
COCO	2,71	61,21	16,58	-	-	60,12	16,28
CONCHA	0,25	1,05	0,03	-	-	0,84	0,02
SANDÍA	1,11	94,57	10,48	46,92	5,199	93,70	10,38
MARACUYÁ	0,44	84,71	3,75	15,35	0,679	85,50	3,78
LECHUGA	0,63	95,58	5,99	29,17	1,828	94,58	5,93
PIÑA	0,42	77,39	3,28	18,93	0,801	69,68	2,95
MANGO	0,24	70,68	1,68	7,68	0,183	68,28	1,62
YUCA	1,25	82,09	10,22	19,09	2,376	80,21	9,99
ZAPALLO	0,72	81,84	5,90	8,34	0,601	81,85	5,90
OTROS	5,47	92,56	50,64	27,68	15,144	91,44	50,03
TOTAL	58,42		466,13		98,84		456,23
RSU CON 58.42%MOP			46,61%		9,88%		45,62%
MOP 100%			79,79%		16,92%		78,09%

EVAPORACIÓN + GAS (Kg/t)					364,83		
GAS (Kg/t)							3,64
MASA REMANENTE (Kg/t) al 58.42% MOP			118,08		120,95		124,48

Fuente: Elaboración propia

Para modelar probabilísticamente una curva, los componentes de la muestra aleatoria deben cumplir una distribución normal, por lo que se los analizó utilizando el programa de software libre R (versión 3.4) (ver Anexo 4). Se hizo el cálculo con los 5 de los 18 componentes de MOP que sí cumplieron con las condiciones de normalidad (ver Cuadro 34), los que en masa constituyen el más del 75% del total de las muestras. Esto indica que, en algunos de los

componentes existe una gran variabilidad en los resultados, lo que es natural en los componentes orgánicos debidos la estacionalidad de los frutos.

La Figura 35 muestra la integración de los resultados de generación diaria de lixiviados (método MGFRS-anaerobio; método propio) de los componentes normalizados que constituyen la composición de los RSU de Guayaquil (orgánicos). Se observa que el pico de la producción diaria ponderada del 58.42% se da el día 14, con un valor de 41.82 Kg/t, y al cabo 25 días el proceso de lixiviación se hace marginal, y en los componentes individuales (al 100%), el máximo es 133.76 Kg/t generado por los cítricos, también en el día 14.

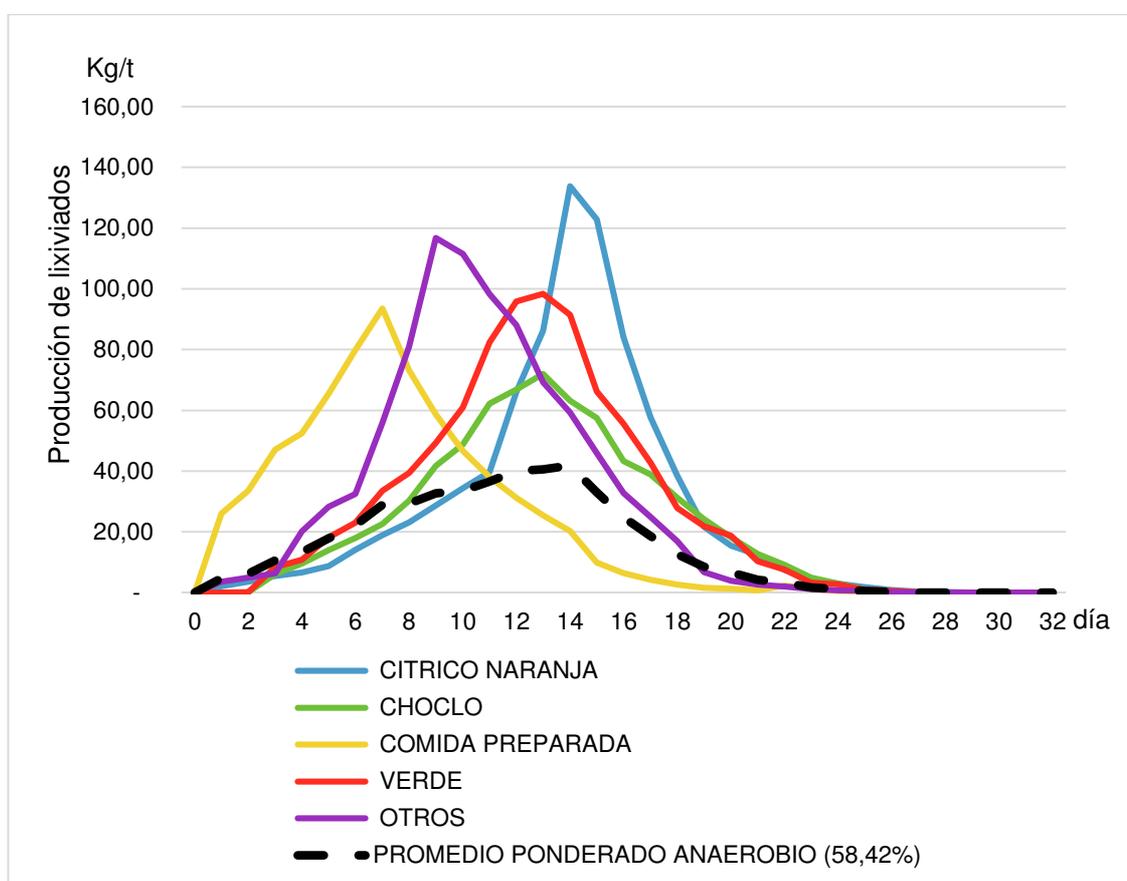


Figura 35 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio anaerobio, solo componentes normalizados.

La Figura 36 muestra los resultados de generación acumulada de lixiviados de los componentes al 100% y el promedio ponderado al 58.42% de MOP, cuya curva presenta un coeficiente de determinación (R^2) con un valor 0.97, lo que representa un buen ajuste de la producción de lixiviados vs días, que se presentaron en la Figura 35. Se observa que, a partir del día 25, se hace

asintótica. El nivel máximo acumulado es 473.64 kg de lixiviados por tonelada de RSU (Anexo 3).

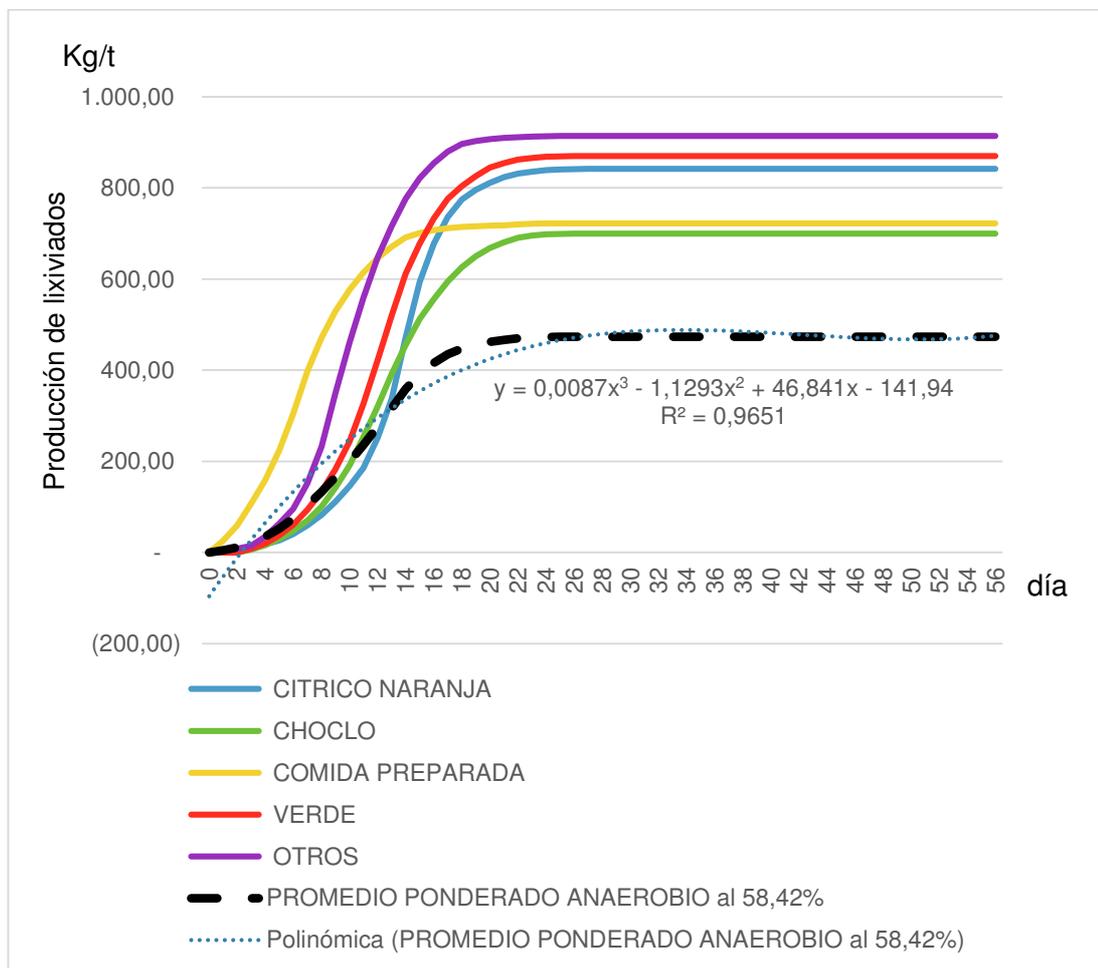


Figura 36 Producción diaria acumulada de lixiviados de RSU con método MGFRS (método propio) medio anaerobio, componentes normalizados.

La Figura 37 muestra la integración de los resultados de generación diaria de lixiviados (método MGFRS-aerobio; método propio) de los componentes normalizados al 100% y el pico del promedio ponderado al 58.42% de MOP se da el primer día con un valor de 50.73 kg/t, y al cabo cinco días el proceso de lixiviación se hace marginal, y en los componentes individuales (al 100%), el máximo es 133.55 Kg/t generado por el plátano verde, también en el primer día.

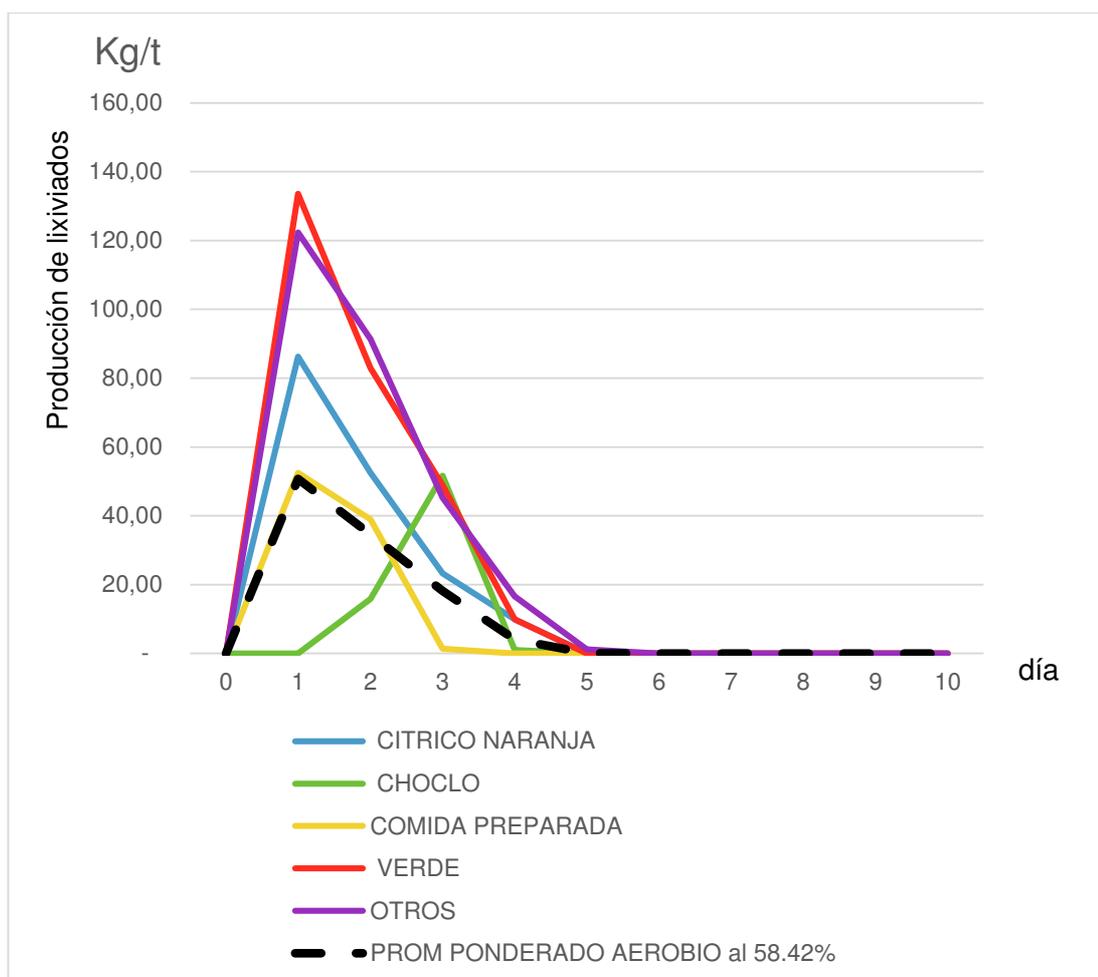


Figura 37 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio aerobio, con componentes normalizados.

La Figura 38 muestra los resultados de generación acumulada de lixiviados al 58.42%, que se presentaron en la Figura 37. Se observa que, a partir del día 5 se hace asintótica. El nivel máximo acumulado es 107.66 kg de lixiviados por tonelada de RSU (ver Anexo 3).

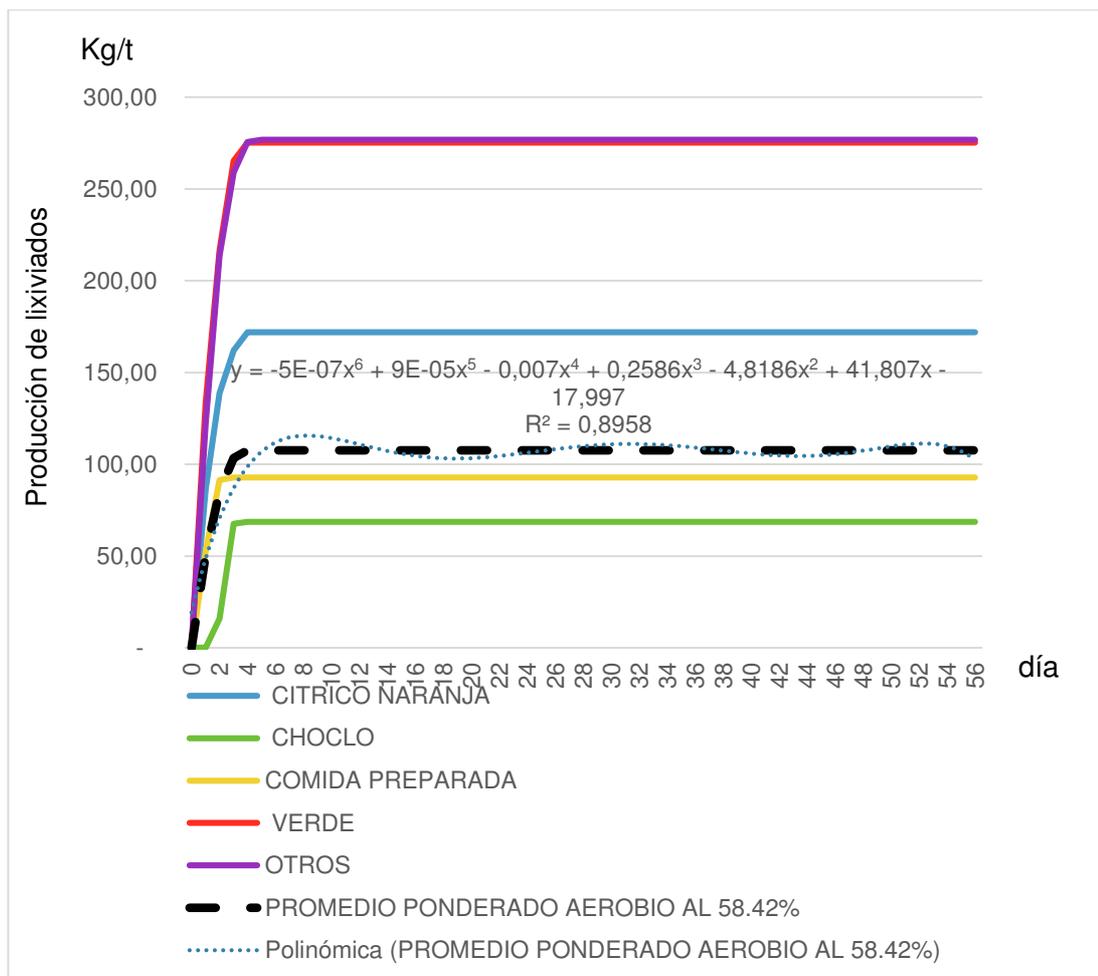


Figura 38 Producción diaria de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medio aerobio, solo componentes normalizados.

Estos resultados corresponden al criterio de que solo los componentes cuya distribución de la muestra es normal, esto es el 75,5% de los componentes

orgánicos (cítricos, choco, comida preparada, cáscara de verde y otros) representan al total de los componentes.

La comparación de la producción de lixiviado de los métodos MGFRS y desecación, con componentes normalizados se presenta a continuación, en la figura 39.

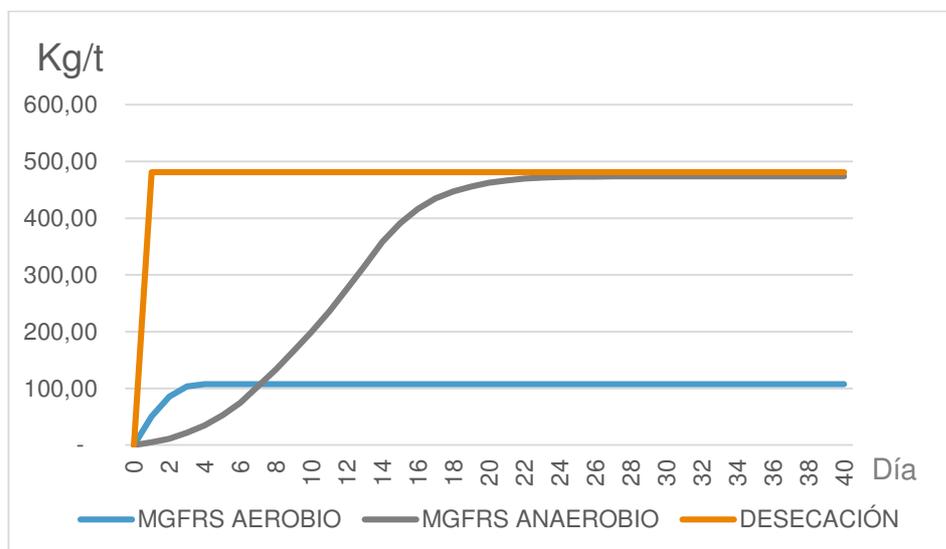


Figura 39 Comparación de la producción diaria acumulada de lixiviados en RSU con el método MGFRS (método propio) medios aerobio y anaerobio, con el método de desecación, solo componentes normalizados.

En el Cuadro 34, se presenta la pérdida máxima de masa obtenida con el método por desecación para los componentes MOP normalizados, con un resultado de 481.13 kg/t (48.1% del 58.42%), es decir, se pierde el 82% de MOP. Con el método gravimétrico por filtración (MGFRS; método propio), en medio anaerobio, la generación de lixiviado es 473.64 Kg/t (47.4% del 58.42%), es decir, el 81%. Con el método (MGFRS; método propio) en medio aerobio, la generación de lixiviados es de 107.66 kg/t (10.8% del 58.42%), es decir, el 18.4% y el valor que corresponde a vapor se obtiene restando el peso total (584,20 kg/t) menos la masa de los lixiviados (107,66 kg/t) y menos el valor remanente (105,64 kg/t) nos da 370,91 kg/t, que significa el 63%, valor que coincide al restar el 81% de producción de lixiviado del proceso anaerobio menos el 18% de producción de lixiviado del proceso aerobio, lo que significaría que los gases en un proceso anaerobio se licuan y se convierten en lixiviados, y los gases que no se licuan son producto de restar el peso total

(584,20 kg/t) menos la masa de los lixiviados (473,64 kg/t) y menos el valor remanente (107,62 kg/t) nos da 2,96 kg/t, que significa el (2,96 del 58,42%) 0,5%. Los valores de masa remanentes, una vez terminado el proceso de desecación y de filtración, son 10.3, 10.6 y 10.8% (del 58,42%) es decir 17.6, 18.2 y 18.5% de la MOP.

Cuadro 34 Generación de lixiviados en RSU con método MGFRS (Método propio) normalizado.

MATERIA ORGÁNICA	CARACTERIZACIÓN (%)	CARACTERIZACIÓN NORMALIZADA (%)	DESECACIÓN		MGFRS AEROBIO		MGFRS ANAEROBIO	
			PERDIDA DE MASA POR DESECACIÓN (%)	PÉRDIDA DE MASA POR DESECACIÓN NORMALIZADA (kg/t)	LIXIVIADO (%)	LIXIVIADO NORMALIZADO (kg/t)	LIXIVIADO (%)	LIXIVIADO NORMALIZADO (kg/t)
CITRICOS	7,44	9,85	86,10	84,84	17,20	16,948	84,19	82,96
CHOCLO	4,86	6,43	71,67	46,10	6,86	4,413	69,95	45,00
COMIDA PREPARADA	12,32	16,32	73,15	119,38	9,27	15,137	72,22	117,86
RESTOS JARDIN	4,55		67,40		4,68		67,06	
PLATANO VERDE	14,02	18,57	88,18	163,73	27,52	51,104	87,00	161,55
GUABA	0,47		60,47		-		3,05	
CANGREGO	0,30		1,00		-		0,83	
CULANTRO	1,24		92,28		30,25		89,35	
COCO	2,71		61,21		-		60,12	
CONCHA	0,25		1,05		-		0,84	
SANDÍA	1,11		94,57		46,92		93,70	
MARACUYÁ	0,44		84,71		15,35		85,50	
LECHUGA	0,63		95,58		29,17		94,58	
PIÑA	0,42		77,39		18,93		69,68	
MANGO	0,24		70,68		7,68		68,28	
YUCA	1,25		82,09		19,09		80,21	
ZAPALLO	0,72		81,84		8,34		81,85	
OTROS	5,47	7,25	92,56	67,08	27,68	20,060	91,44	66,27
TOTAL NORMALIZADO		58,42		481,13		107,66		473,64
TOTAL (CUADRO 33)	58,42			466,13		98,84		456,23
VAPOR + GAS (Kg/t)						370,91		
GAS (Kg/t)								2,96
MASA REMANENTE (Kg/t)				103,08		105,64		107,62

Fuente: Elaboración propia

4.1.4.1.1 Modelación de los ensayos de laboratorio con componentes normalizados medio anaerobio

En este capítulo, se analizan exclusivamente los componentes que tienen una representación normalizada en los muestreos de caracterización. Con los resultados de los volúmenes de producción de lixiviados acumulados en los ensayos de laboratorio, que se observan en la Figura 36, la ecuación polinómica que más se ajusta con un $R^2 = 0.9651$ es la siguiente:

$$y = 0.0087x^3 - 1.1293x^2 + 46.841x - 141.94$$

La curva obtenida está muy ajustada a la variación de la producción de lixiviados vs días, ya que el coeficiente de determinación (R^2) está muy cercano a uno.

4.1.4.1.2 Modelación de los ensayos de laboratorio con componentes normalizados medio aerobio.

Al igual que en el caso anterior, con los resultados de los volúmenes de producción de lixiviados acumulados en los ensayos de laboratorio, que se observan en la Figura 38, la ecuación polinómica que más se ajusta con un $R^2 = 0.8958$ es la siguiente:

$$y = -5E-07x^6 + 9E-05x^5 - 0.007x^4 + 0.2586x^3 - 4.8186x^2 + 41.807x - 17.997$$

La curva obtenida está muy ajustada a la variación de la producción de lixiviados vs días, ya que el coeficiente de determinación (R^2) está muy cercano a uno.

4.1.4.1.3 Resumen de los resultados de descomposición de los RSU de Guayaquil medidos en laboratorio.

Comparando los resultados obtenidos al analizar en laboratorio la descomposición en líquidos y gases de todos los componentes de los RSU que ingresan al relleno sanitario de Guayaquil, sumado a los resultados de los análisis de los componentes cuya distribución de las muestras es normalizada

(75.5% de la masa de los componentes MOP) y con la proyección estimando que los componentes normalizados constituyen el 100%, obtenemos el Cuadro 35.

Cuadro 35 Comparación de resultados de descomposición de los RSU de Guayaquil medidos en laboratorio.

DETALLE DE DESCOMPOSICIÓN DE RSU MEDIDOS EN LABORATORIO	LIXIVIADOS (AEROBIO)	LIXIVIADOS + VAPOR CONDENSADO (ANAEROBIO)	GASES NO LICUABLES	MASA REMANENTE	VALORES RELACIONADOS AL:
COMPONENTES MOP (TODOS)	17%	78%	0,6%	20%	100% MOP
	98,84 Kg/t	456,23 Kg/t	3,64 Kg/t	121,17 Kg/t	58,42% MOP
COMPONENTES MOP NORMALIZADOS	18%	81%	0,5%	18%	100% MOP
	107,66 Kg/t	473,64 Kg/t	2,96 Kg/t	105,45 Kg/t	58,42% MOP

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que los porcentajes de lixiviados medidos en masa, desarrollados en laboratorio, están entre 17% y 18% de la MOP, la evaporación precipitada en lixiviados está entre 61% (78-17%) y 63% (81-18%), los gases no licuables están entre 0,6 y 0,5% y la masa remanente de los MOP queda entre el 20% y el 18%, lo que se puede apreciar en figura 40.

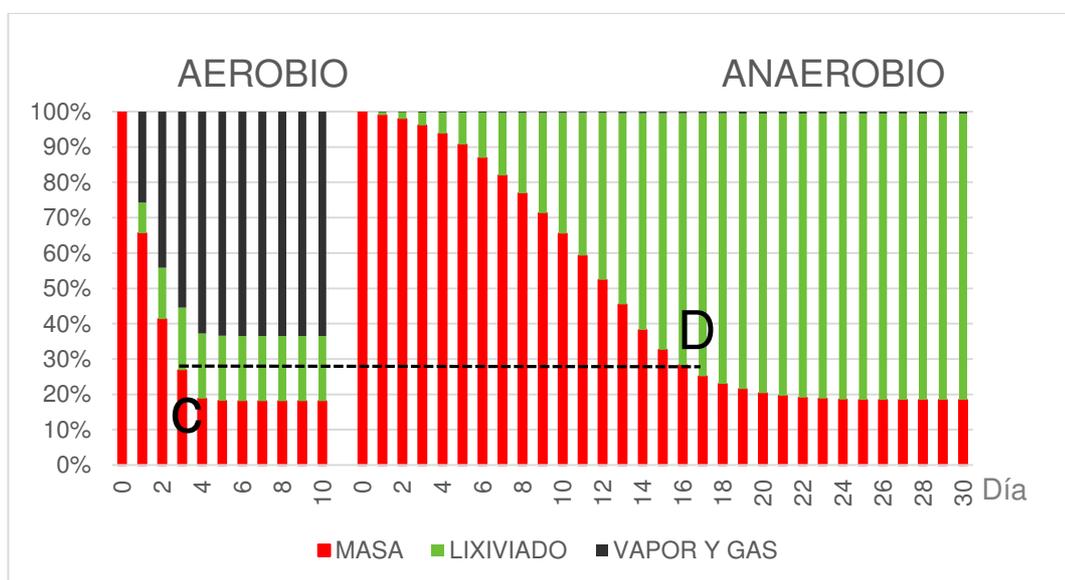


Figura 40 Masa remanente, producción de lixiviados, vapor y gas en procesos MGFRS aerobio y anaerobio normalizados.

Considerando que los ensayos de laboratorio se realizaron con residuos recién generados, que el proceso de recolección de basura en Guayaquil generalmente es interdiario (pasando 1 o 2 días), por lo que la basura en promedio se demora 2 días antes de llegar al relleno, y que el proceso aerobio es prácticamente inmediato mientras que el anaerobio llega a su plenitud en 14 días, se ha hecho una combinación de los dos procesos normalizados (aerobio y anaerobio), descartando los dos primeros días del proceso aerobio, asumiendo que el tercer día continúa con proceso aerobio (ya que las celdas se cubren al día siguiente de su descarga), y el proceso anaerobio se inicia el cuarto día (con la masa remanente del proceso aerobio del tercer día). Para el proceso combinado se tomó la masa remanente de cada uno de los elementos al tercer día del proceso aerobio y se buscó la masa semejante en el desarrollo diario anaerobio para continuar con el cálculo de generación de lixiviados (puntos C y D de las figuras 40 y 41), los resultados se presentan en el cuadro 36.

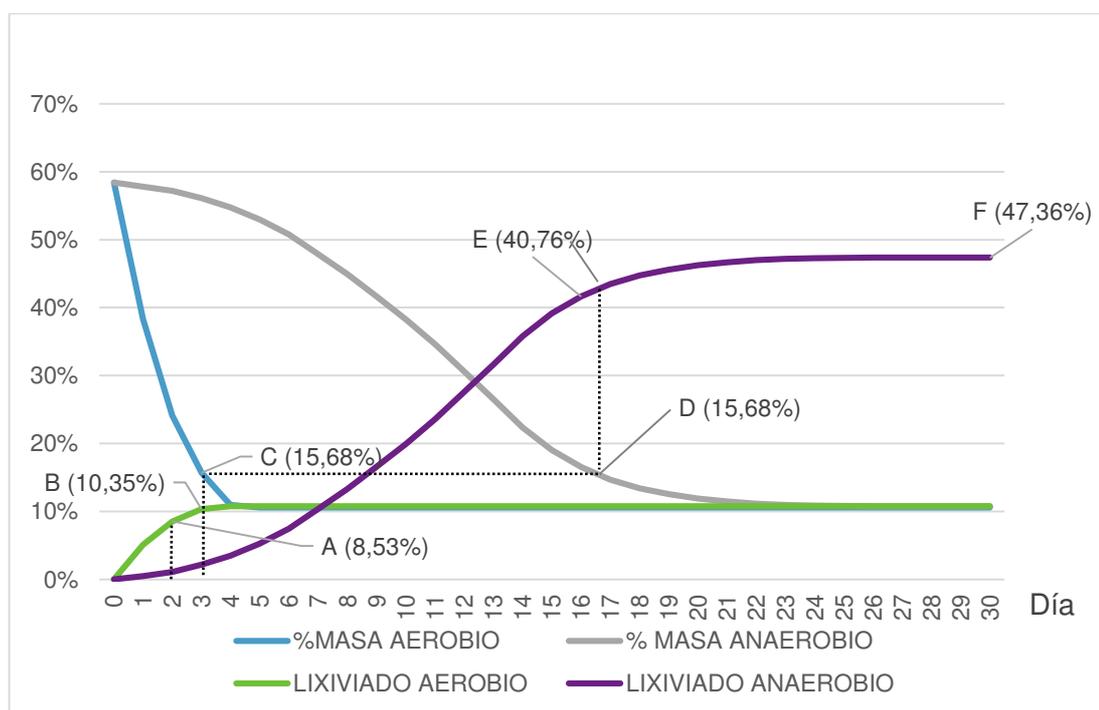


Figura 41 MGFRS aerobio y anaerobio al 58,42% MOP

Cuadro 36 Combinación de curvas aerobias y anaerobias MGFRS normalizadas simulando las condiciones del relleno sanitario de Guayaquil

DIA	CITRICOS		CHOCLO		COMIDA PREPARADA		PLATANO VERDE		OTROS		58,42% MOP	MGFRS
	Kg	LIXIVIADO Kg/t	Kg	LIXIVIADO Kg/t	Kg	LIXIVIADO Kg/t	Kg	LIXIVIADO Kg/t	Kg	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	PROCESO
	PESO PROM	PROM DIARIO	PESO PROM	PROM DIARIO	PESO PROM	PROM DIARIO	PESO PROM	PROM DIARIO	PESO PROM	PROM DIARIO		
0	1.000,00	-	1.000,00	-	1.000,00	-	1.000,00	-	1.000,00	-	-	AEROBIO
1	490,91	86,29	638,4	-	558,49	52,47	755,63	133,55	861,69	122,36	-	AEROBIO
2	374	52,47	330,14	15,87	393,14	38,95	513,59	82,9	323,03	91,41	-	AEROBIO
3	262,79	23,29	302,07	51,69	318,06	1,33	260,16	48,88	155,4	45,26	18,19	AEROBIO
4	251,22	57,74	300	2,94	305,98	20,27	219,91	42,81	143,78	32,82	37,71	ANAEROB
5	212,58	38,46	299,06	0,95	296	9,88	191,5	27,83	118,75	24,92	50,14	ANAEROB
6	190,92	21,67	298,68	0,38	289,58	6,42	169,33	21,81	101,63	16,9	58,62	ANAEROB
7	175,37	15,46	298,68	-	285,31	4,17	150,58	18,75	94,81	6,72	64,8	ANAEROB
8	162,75	12,44	298,68	-	282,66	2,65	140,44	10,26	90,9	3,9	68,64	ANAEROB
9	155,3	7,45	298,68	-	281,13	1,52	132,79	7,54	88,3	2,6	71,21	ANAEROB
10	150,78	4,52	298,68	-	279,91	1,22	129,49	3,3	86,35	1,95	72,61	ANAEROB
20	144,79	-	298,68	-	274,83	-	125,12	-	83,54	-	75,05	ANAEROB
30	144,79	-	298,68	-	274,83	-	125,12	-	83,54	-	75,05	ANAEROB

Fuente: Elaboración propia

Al graficar la curva combinada aerobio – anaerobio de MGFRS normalizado encontramos que la máxima producción (19.51 Kg/t con 58.42% MOP) se da el día 4, que corresponde al día 2 del relleno sanitario. (ver Figura 42)

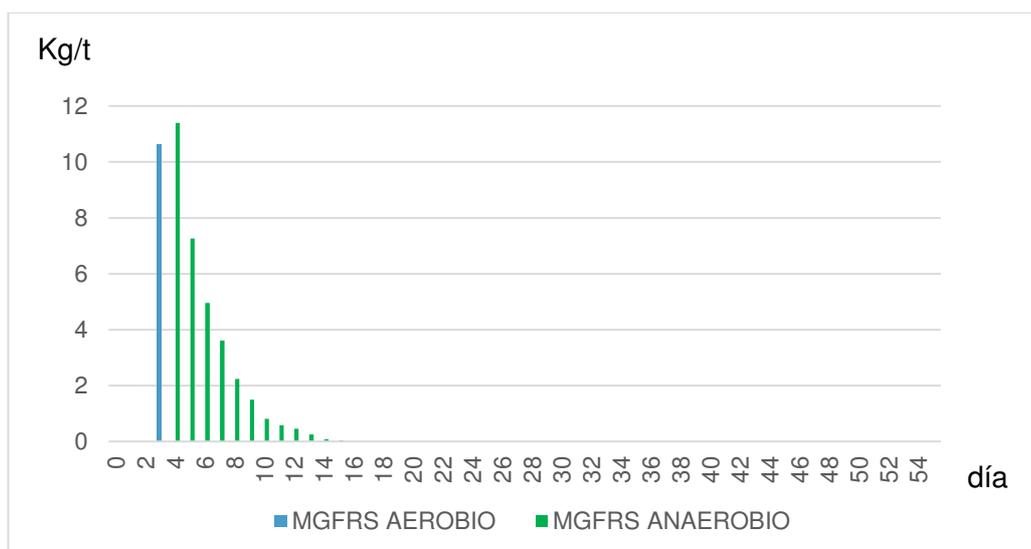


Figura 42 Producción diaria de lixiviados de la combinación del proceso MGFRS aerobio – anaerobio normalizado. Elaboración propia.

La curva de generación diaria acumulada de lixiviados con la combinación del proceso MGFRS normalizado aerobio – anaerobio tiene un valor máximo de 75.05 Kg/t (7.50% al 58.42% MOP) y a partir del día 15 se hace asintótica. (Figura 43.)

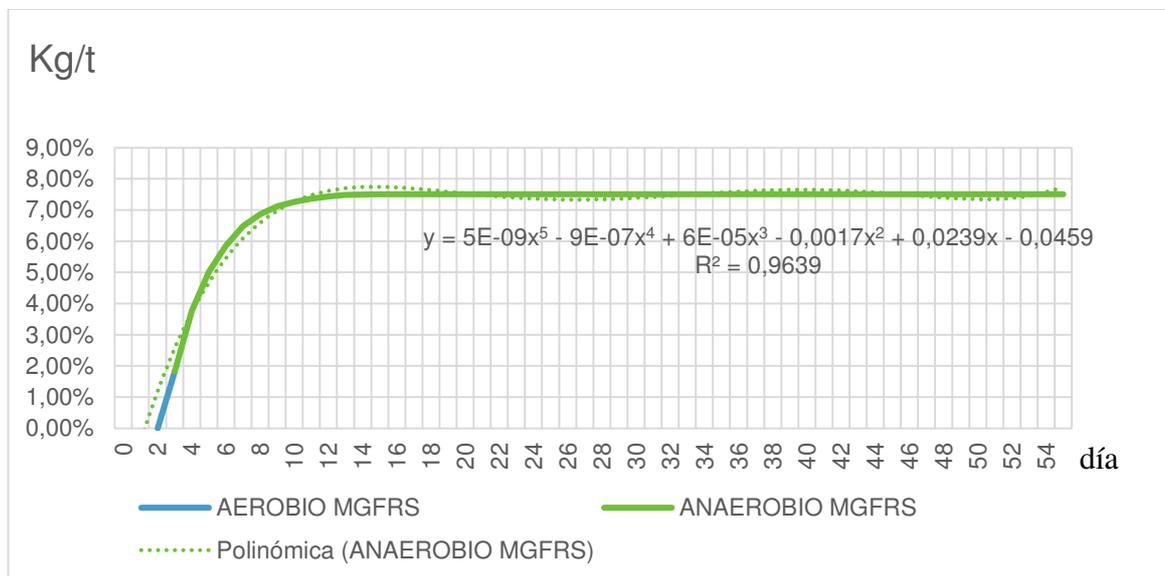


Figura 43 Producción diaria acumulada de lixiviados de la combinación del proceso MGFRS aerobio – anaerobio normalizada. Elaboración propia

4.1.4.1.4 Medición de los niveles potenciales de contaminación de los procesos de descomposición en medios aerobios y anaerobios.

Dada la diferencia en volumen de producción de lixiviados entre el proceso aerobio y el anaerobio, en alrededor de 4 veces, se procedió a analizar químicamente las muestras en sus máximos niveles, esto es a los dos días la muestra aerobia y a seis días la muestra anaerobia, los resultados se encuentran en el Anexo 8 y solo los elementos que superaron los niveles máximos permitidos se muestran en el cuadro 37, vale resaltar que en el proceso aerobio, los ensayos de demanda química de oxígeno (DQO) sobrepasan 473 veces, los de demanda biológica de oxígeno (DBO) 406, cobre 1461, cloruros 10, nitrógeno 38, fósforo 167, hierro 307, los anaerobios sobrepasan los límites permitidos en menor rango sin dejar de ser importantes en el caso de DBO es 25 veces, DQO 30, cobre 16, cloruros 1,2, nitrógeno 7,2, fósforo 39, hierro 1,5. Siendo que la relación de diferencia de volumen es de 4 a 1 entre los aerobios y anaerobios, mientras que en el caso de DBO y

DQO es 16 veces, 89 en cobre, 20 en hierro, 107 en zinc, etc. Esto significa que el proceso aerobio que normalmente se da en los botaderos es potencialmente más contaminante a pesar de tener 4 veces menos volumen que el lixiviado producido en un proceso anaerobio, propio de un relleno sanitario, en donde generalmente se les da tratamiento (en el caso de Guayaquil se los elimina).

Cuadro 37 Elementos que no cumplen con los rangos permitidos para descarga a un cuerpo de agua

Descripción		PESO PROMEDIO		Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce (3)	EXCEDE LOS LÍMITES AERÓBICOS (1) ÷ (3)	EXCEDE LOS LÍMITES ANAERÓBICOS (2) ÷ (3)	EXCEDE LOS LÍMITES AERÓBICO ÷ ANAERÓBICO
PORCENTAJE		67,18%					
PORCENTAJE AJUSTADO		100%					
PARAMETROS	UNIDAD	AEROBIO (1)	ANAEROBIO (2)				
Potencial de hidrogeno	UNIDAD pH	5,53	7,37	6-9	ACID		
Demanda de oxígeno bioquímico	mg/l	40.553,13	2.458,17	100	405,53	24,58	16,5
Demanda química de oxígeno	mg/l	94.502,48	5.906,49	200	472,51	29,53	16
Sólidos totales	mg/l	25.255,02	7.955,16	1.600	15,78	4,97	3,17
Cobre	mg/l	1.460,86	16,49	1	1.460,86	16,49	88,57
Sulfatos	mg/l	582,77	104,1	1.000	0,58	0,1	5,6
Cloruros	mg/l	10.142,82	1.231,17	1.000	10,14	1,23	8,24
Sólidos suspendidos	mg/l	87,61	20,81	130	0,67	0,16	4,21
Amoniaco	mg/l	576,03	162,87	30	19,2	5,43	3,54
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/l	1.135,21	215,81	30	37,84	7,19	5,26
El fósforo total como PO4-3	mg/l	1.672,21	389,47	10	167,22	38,95	4,29
Hierro	mg/l	3.068,63	15,33	10	306,86	1,53	200,14
Zinc	mg/l	149,73	1,4	5	29,95	0,28	107,2
Cianuros	mg/l	0,38	0,11	0,1	3,76	1,14	3,31
Fenoles	mg/l	0,77	0,12	0,2	3,85	0,59	6,49

4.1.4.2 Lisímetros de escala piloto de RS

Con la idea de establecer las relaciones entre el porcentaje de materia orgánica putrescible y el volumen de lixiviados generado, se hicieron ensayos en lisímetros de escala piloto de RS con diferentes combinaciones: 60% de material putrescible (similar a los RSU de Guayaquil), 100% como condición máxima crítica, 50% como condición media y 33%, lo cual que representa las condiciones de mayor contenido de materia orgánica en Estados Unidos y en algunos países europeos.

Usando los residuos que ingresan al relleno sanitario, se los clasificó de acuerdo a su composición y la requerida para los ensayos en los lisímetros cuyas características se ajustan a la de las celdas en su altura, características de drenaje y cobertura, considerando una chimenea de 2 pulgadas y un dren de similares dimensiones.

Estos lisímetros simulan a un relleno sanitario donde las condiciones aerobias son solo iniciales hasta que se consume el aire entrampado entre los residuos, de tal forma que se comporta como los ensayos MGFRS anaerobios.



Figura 44 Lisímetros de escala piloto de RS, ubicados en el RS Las Iguanas.

Para efectos de tener trabajos simultáneos con las diferentes combinaciones de MOP (Cuadro 38), se implementaron 6 tanques (Figura 44) con las características expresadas en la metodología (Capítulo 3).

Cuadro 38. Combinaciones entre materia orgánica putrescible y materia orgánica absorbente en lisímetros

LISIMETRO	L1	L2	L3	L5	L6	L7	L12	TQ1	TQ2	TQ6
% MOP	33%	100%	50%	60%	60%	100%	60%	100%	100%	60%
% PAPEL	31%	0%	10%	8%	10%	0%	10%	0%	0%	10%
Masa (t)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.15	1.20	1.20	1.15
Días	152	164	235	199	15	81	40	121	148	105

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de producción de lixiviados en los lisímetros con diferentes combinaciones de materia orgánica son semejantes, como se observa en la Figura 45. Sus volúmenes máximos se dan en los primeros 7 días y a los 15 días se ha descargado la mayoría de su producción. La excepción es el caso del lisímetro con 33% de materia orgánica putrescible, que nunca produjo lixiviados, lo que coincide con la experiencia de los Estados Unidos y gran parte de los países europeos.

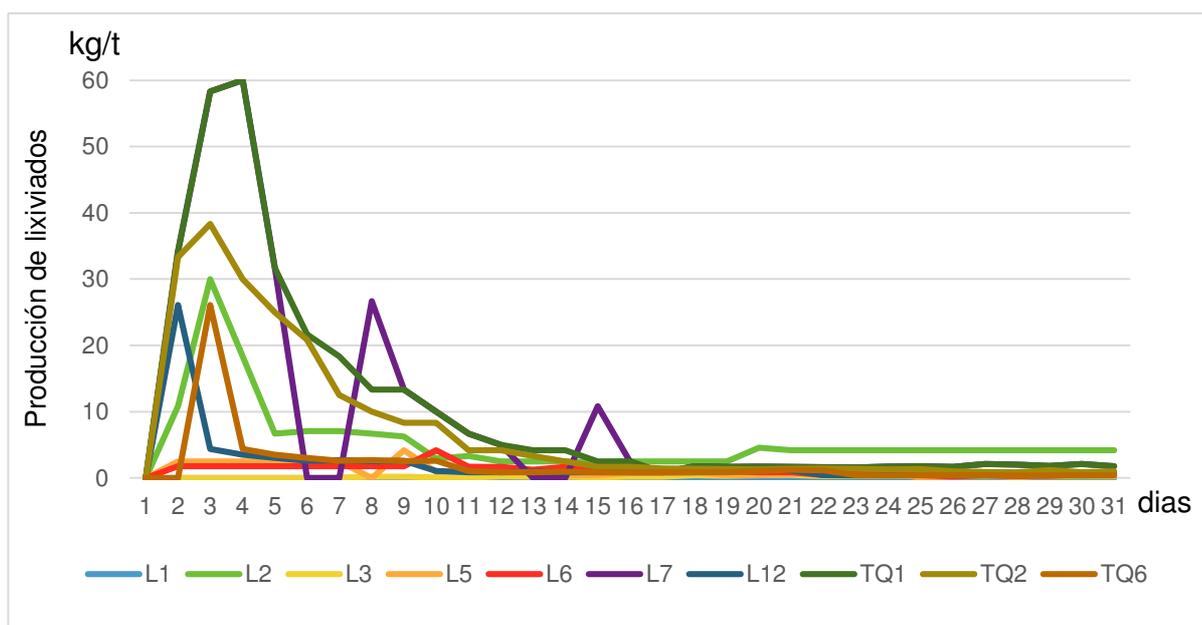


Figura 45 Generación diaria de lixiviados en lisímetros en los primeros 30 días.

La producción total de lixiviados se extiende en algunos casos más de 200 días, como se puede apreciar en la Figura 46.

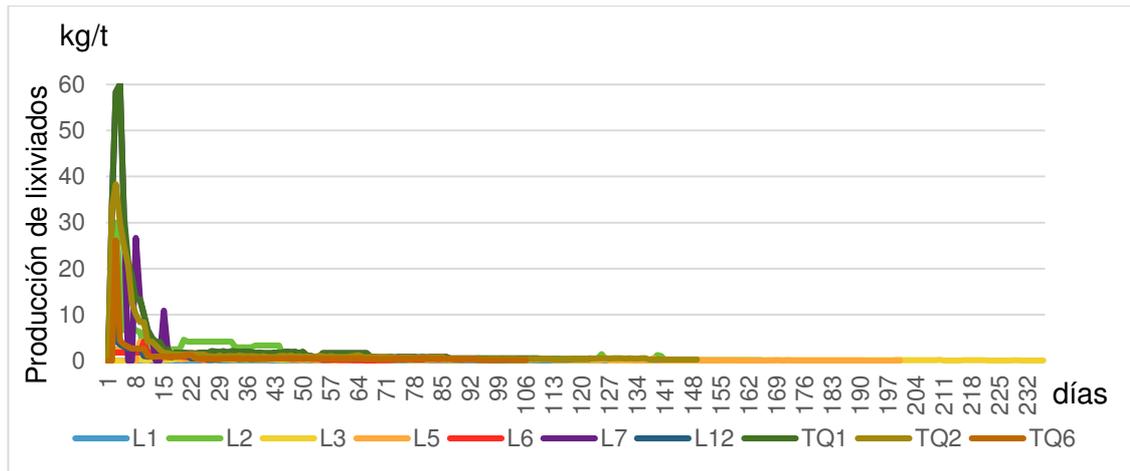


Figura 46 Generación diaria de lixiviados en lisímetros en 235 días.
Elaboración propia

4.1.4.2.1 Modelación determinística en lisímetros.

Con los datos de generación diaria de lixiviados en lisímetros, se calcularon las curvas de modelación determinística (matemática), mediante el software Matlab versión R2016a (licenciado a Ing. Marcelo Apolo Espinoza).

En el caso del lisímetro con 50% de MOP, la modelación corresponde a un Spline tipo polinomio (ppform) de orden k (Figura 47), que provee una descripción de la naturaleza de un evento mediante sumas sucesivas de términos llamados $p(x)$, donde los coeficientes a obtener denominados por c determinan una función polinómica para cada intervalo (break) dado por E_i .

$$p_j(x) = \sum_{i=1}^k (x - \xi_j)^{k-i} c_{ji}, \quad j=1:l$$

Ec. 05

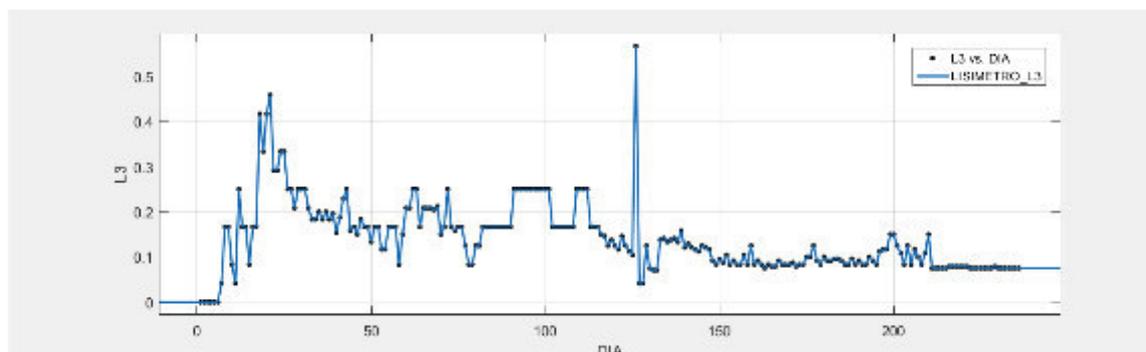


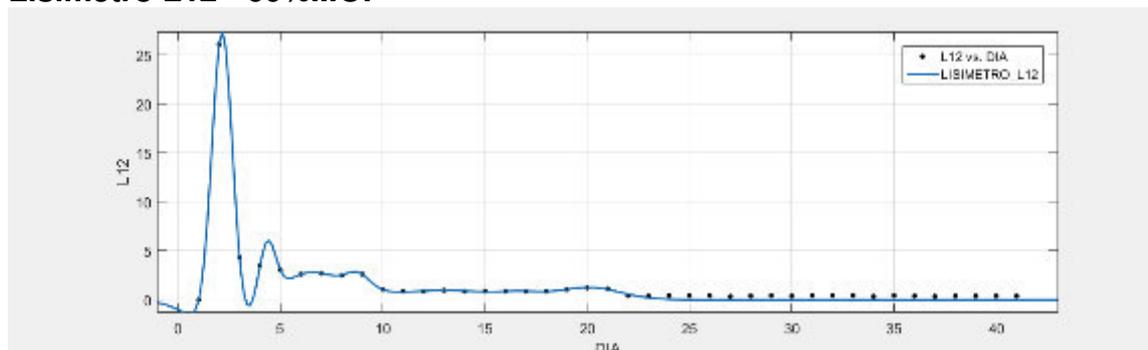
Figura 47 Lisímetro L3 (Polinomio pp) Kg/t vs días.

Los resultados de producción de lixiviados del lisímetro con 50% MOP (Figura 47) no guarda una relación típica Gaussiana, demuestran un comportamiento fuera de control, no constante, errático, y puede o no tener producción de lixiviados ya que hay una variabilidad muy grande. (Ver Anexo 7)

En el resto de los lisímetros, con 60% y 100% de MOP, las modelaciones determinísticas cumplen un desarrollo spline tipo Gauss de orden k, que provee una descripción de la naturaleza de un evento mediante sumas sucesivas de términos llamados $p(x)$, donde los coeficientes a obtener denominados por a, b, c determinan una suma de funciones.

$$p(x) = \sum a_i \cdot e^{\frac{-(x-b_i)}{c_i}^2} \quad \text{Ec. 06}$$

Lisímetro L12 - 60%MOP

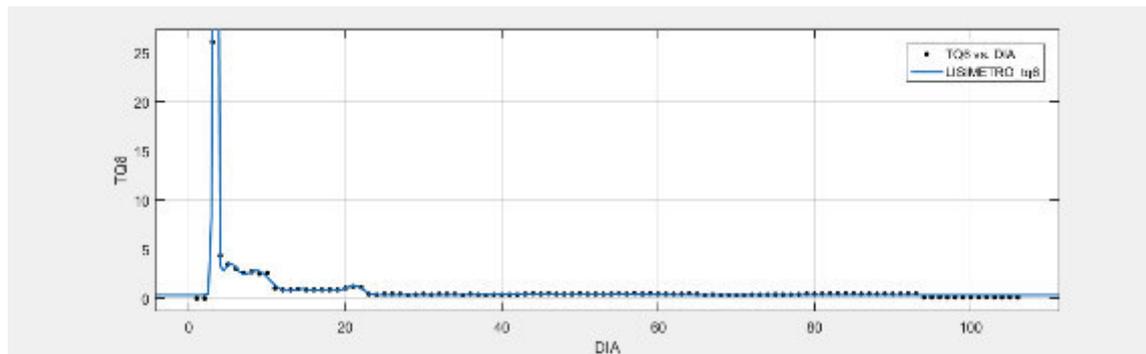


Modelo Gauss8:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2) + a6 \cdot \exp(-((x-b6)/c6)^2) + a7 \cdot \exp(-((x-b7)/c7)^2) + a8 \cdot \exp(-((x-b8)/c8)^2)$$

a1 =	30.91	c3 =	0.207	b6 =	-0.07571
b1 =	-1.573	a4 =	1.389	c6 =	0.1808
c1 =	0.05963	b4 =	-1.019	a7 =	0.946
a2 =	6.495	c4 =	0.06758	b7 =	-0.6525
b2 =	-1.391	a5 =	4.281	c7 =	0.2743
c2 =	0.0507	b5 =	-1.328	a8 =	0.4921
a3 =	-6.184	c5 =	0.282	b8 =	-0.3535
b3 =	-1.504	a6 =	1.246	c8 =	0.1254

Lisímetro TQ6 – 60% MOP



General model Gauss8:

$$f(x) =$$

$$a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) +$$

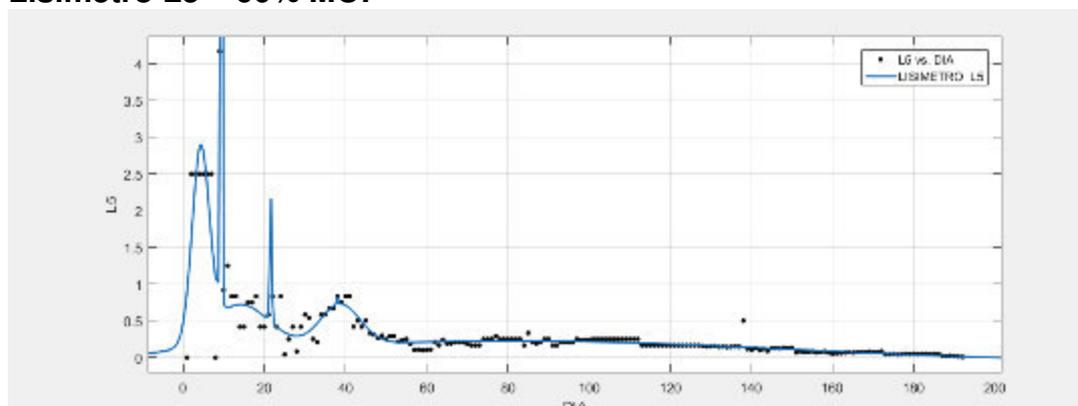
$$a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) +$$

$$a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2) + a6 \cdot \exp(-((x-b6)/c6)^2) +$$

$$a7 \cdot \exp(-((x-b7)/c7)^2) + a8 \cdot \exp(-((x-b8)/c8)^2)$$

a1 =	113.1	c3 =	2.363	b6 =	16.2
b1 =	3.383	a4 =	0.903	c6 =	2.334
c1 =	0.3135	b4 =	21.24	a7 =	0.3381
a2 =	2.879	c4 =	1.461	b7 =	63.36
b2 =	5.14	a5 =	2.481	c7 =	1.233e+06
c2 =	1.483	b5 =	8.667	a8 =	0.1401
a3 =	40.06	c5 =	2.417	b8 =	48.81
b3 =	16.2	a6 =	-39.57	c8 =	9.763

Lisímetro L5 – 60% MOP

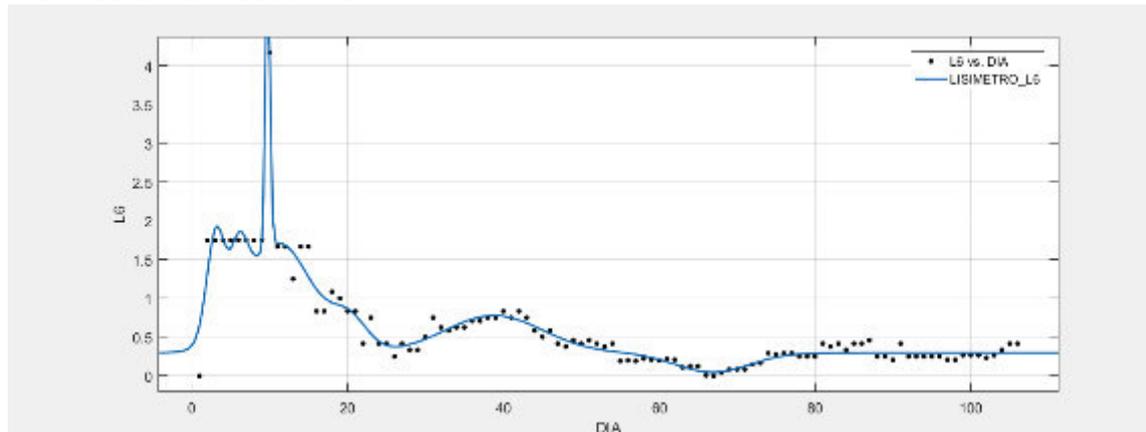


General model Gauss8:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2) + a6 \cdot \exp(-((x-b6)/c6)^2) + a7 \cdot \exp(-((x-b7)/c7)^2) + a8 \cdot \exp(-((x-b8)/c8)^2)$$

a1 =	2.566	c3 =	877.1	b6 =	13.96
b1 =	4.332	a4 =	0.5563	c6 =	10.23
c1 =	2.952	b4 =	38.64	a7 =	0.1085
a2 =	14.07	c4 =	6.906	b7 =	38
b2 =	9.37	a5 =	1.805	c7 =	0.1349
c2 =	0.3099	b5 =	21.59	a8 =	0.2934
a3 =	-0.06812	c5 =	0.3283	b8 =	81.64
b3 =	40.89	a6 =	0.6101	c8 =	96.27

Lisímetro L6 – 60% MOP

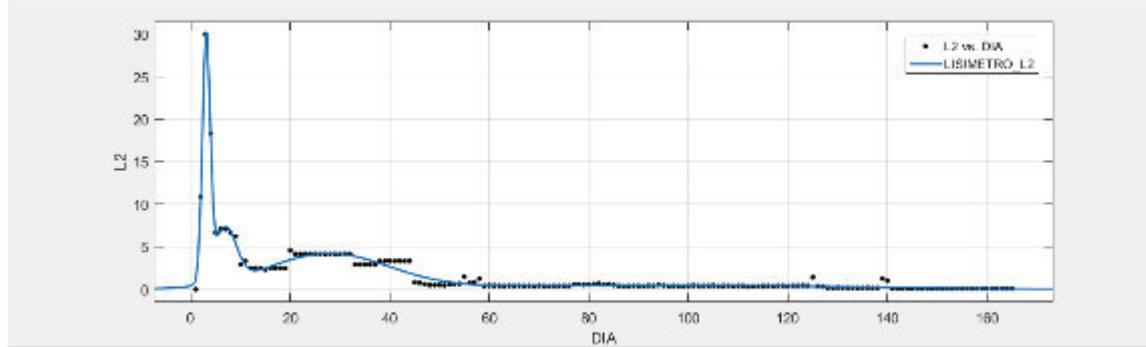


Modelo Gauss8:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2) + a6 \cdot \exp(-((x-b6)/c6)^2) + a7 \cdot \exp(-((x-b7)/c7)^2) + a8 \cdot \exp(-((x-b8)/c8)^2)$$

a1 =	3.682	c3 =	6.063	b6 =	42.2
b1 =	9.737	a4 =	108.4	c6 =	1.015e+05
c1 =	0.4224	b4 =	4.468	a7 =	0.4812
a2 =	-107.5	c4 =	1.886	b7 =	38.81
b2 =	4.473	a5 =	0.3991	c7 =	8.853
c2 =	1.87	b5 =	20.22	a8 =	-0.2503
a3 =	1.416	c5 =	3.296	b8 =	66.88
b3 =	11.14	a6 =	0.2961	c8 =	6.689

Lisímetro L2 – 100%MOP

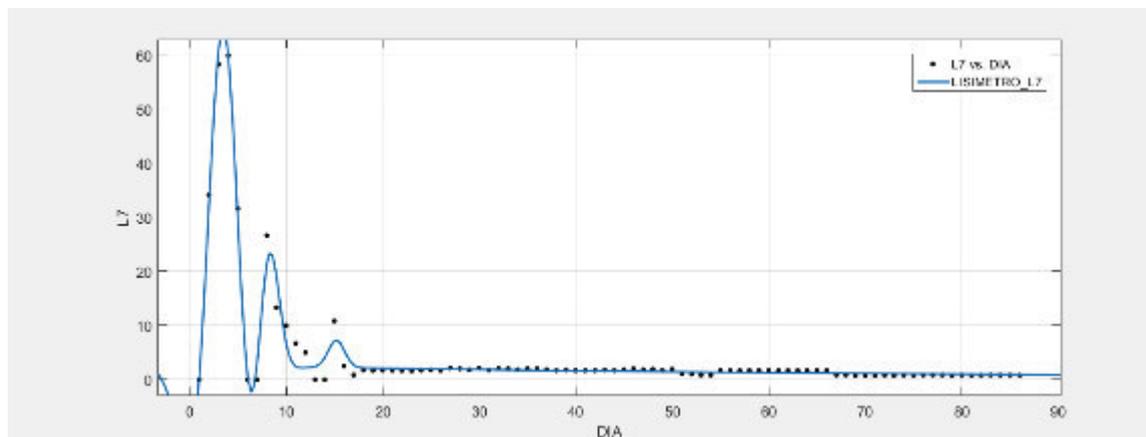


Modelo Gauss4:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2)$$

a1 =	28.56	b2 =	6.913	c3 =	17.28
b1 =	3.13	c2 =	3.131	a4 =	0.4867
c1 =	1.081	a3 =	4.107	b4 =	92.18
a2 =	6.407	b3 =	27.63	c4 =	54.51

Lisímetro L7 – 100% MOP

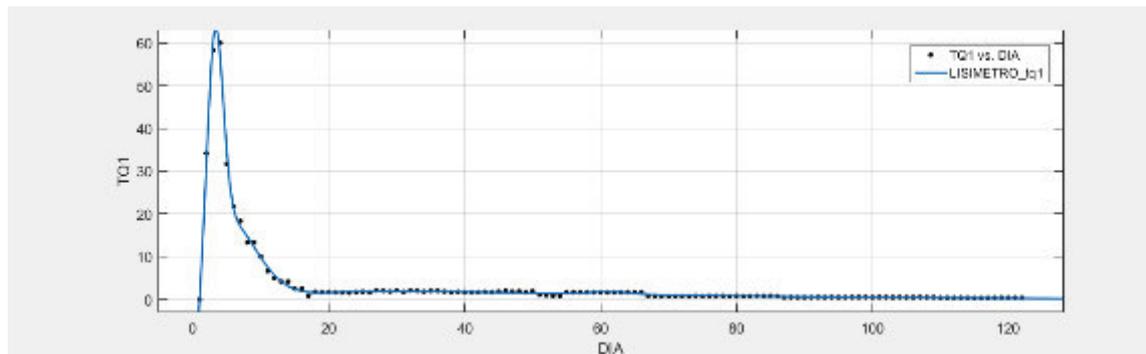


Modelo Gauss5:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2)$$

a1 =	-6.201e+04	a3 =	5.063	c4 =	2.898
b1 =	3.572	b3 =	15.21	a5 =	
c1 =	2.901	c3 =	1.192		5.945e+08
a2 =	36.71	a4 =		b5 =	-3157
b2 =	8.086	6.207e+04		c5 =	719.9
c2 =	1.525	b4 =	3.571		

Lisímetro TQ1 – 100% MOP

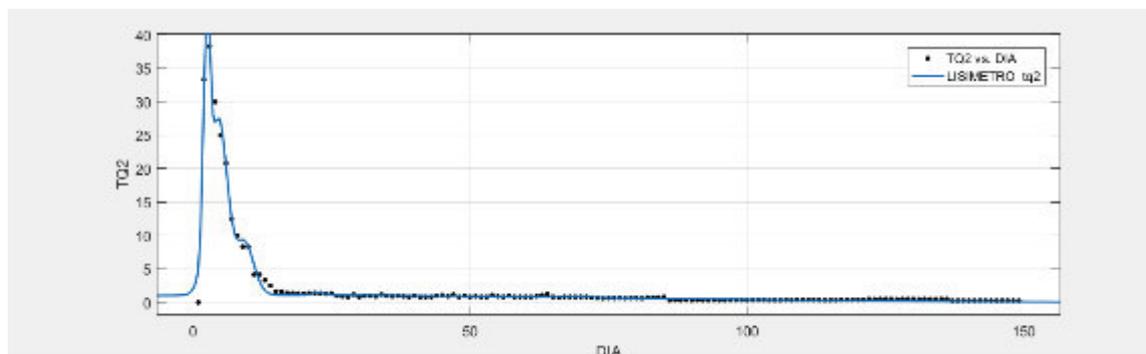


Model Gauss5:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2)$$

a1 =	50.96	c2 =	7.709	b4 =	-24.55
b1 =	3.244	a3 =	1.723e+14	c4 =	93.72
c1 =	1.659	b3 =	-269	a5 =	0.5799
a2 =	44.3	c3 =	50.33	b5 =	61.38
b2 =	1.979	a4 =	2.803	c5 =	4.271

Lisímetro TQ2 – 100%MOP



Modelo Gauss6:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2) + a6 \cdot \exp(-((x-b6)/c6)^2)$$

a1 =	32.06	a3 =	2377	a5 =	0.09335
b1 =	2.495	b3 =	6.619	b5 =	70.29
c1 =	0.8047	c3 =	2.826	c5 =	2.302
a2 =	-2363	a4 =	0.3924	a6 =	1.097
b2 =	6.632	b4 =	22.68	b6 =	15.67
c2 =	2.809	c4 =	1.58	c6 =	87.09

En resumen, para los casos de los lisímetros con 60% y 100% de MOP, el desarrollo de la producción diaria de lixiviados converge en una distribución Gaussiana.

4.1.4.2.2 Modelación probabilística (estadística) en lisímetros.

Las curvas de generación diaria de lixiviados en los lisímetros además se analizaron mediante el programa de software libre R (versión 3.4); se buscó si estas seguían una distribución F de Fisher, distribución Ji cuadrada o una distribución normal, pero los resultados fueron negativos en todos los casos (Anexo 6). El programa arrojó distribuciones técnicas con probabilidades de ocurrencia de funciones en x $f(x)$ diferentes para diferentes rangos de intervalo. Dado que no se obtuvieron ecuaciones para diagramar la trayectoria de las producciones diarias de lixiviados, se analizaron la acumulación de estas producciones, buscando curvas de tendencias exponenciales y logarítmicas.

MODELACION EN LISIMETRO CON 50% MOP

```
> #Ajuste del primer modelo
> mod1<-lm(y ~ log(x))
> rmod1<-summary(mod1) #Resumen del modelo
> rmod1

Call:
lm(formula = y ~ log(x))

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-4.9030 -3.4420  0.1916  2.2670 24.4987

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -24.4987     1.1939  -20.52  <2e-16 ***
log(x)       9.8557     0.2609   37.78  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 3.828 on 233 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8597, Adjusted R-squared:  0.8591
F-statistic: 1427 on 1 and 233 DF, p-value: < 2.2e-16

> anova(mod1) #Tabla anova
Analysis of Variance Table

Response: y
          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
log(x)     1  20913 20912.8  1427.3 < 2.2e-16 ***
```

```

Residuals 233    3414    14.7
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
> plot(x,y) #Gráfico del modelo 1
> lines(x,predict(mod1),lty=2,col="blue",lwd=3)
> title(main=paste("Ajuste del modelo y=",round(mod1$coefficients[1]
,2),
+               "+",round(mod1$coefficients[2],2),"*log(x)"),
+       sub=paste("R squared:",round(rmod1$r.squared,4)))
>
>

```

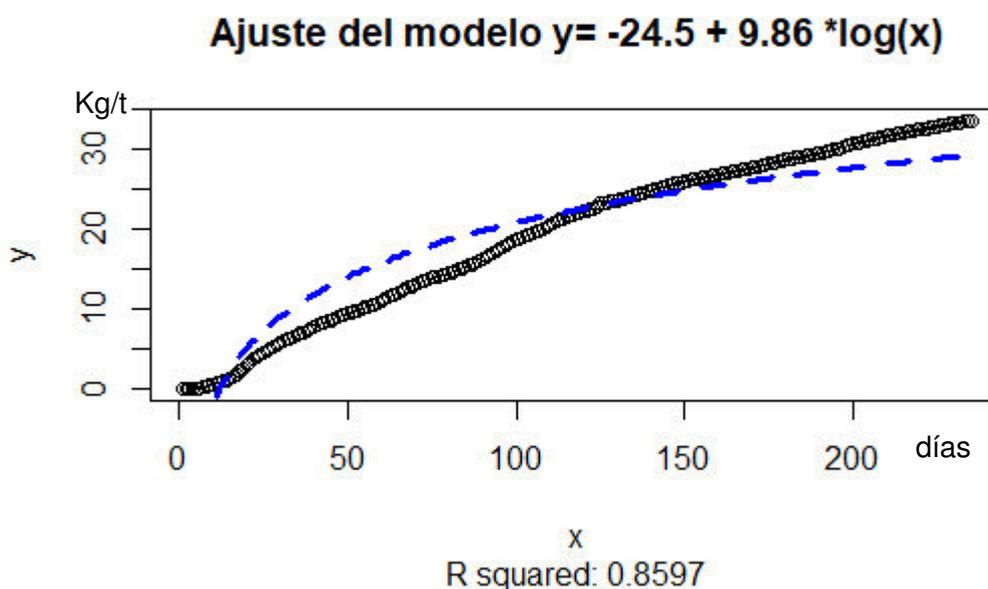


Figura 48 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L3 con 50% MOP. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones (ver Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y $R^2=0.8597$. La ecuación es $y = -24,5+9,86 \cdot \log(x)$, que se muestra en la Figura 48. En el programa de software libre R (versión 3.4) la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación en lisímetros con 60% MOP

Para determinar la modelación del lisímetro L5 (60% MOP), se cuenta con las diferentes ecuaciones para determinar la curva que se ajuste a las condiciones de Anova (análisis de la varianza) cuyo coeficiente p sea menor a 0,05.

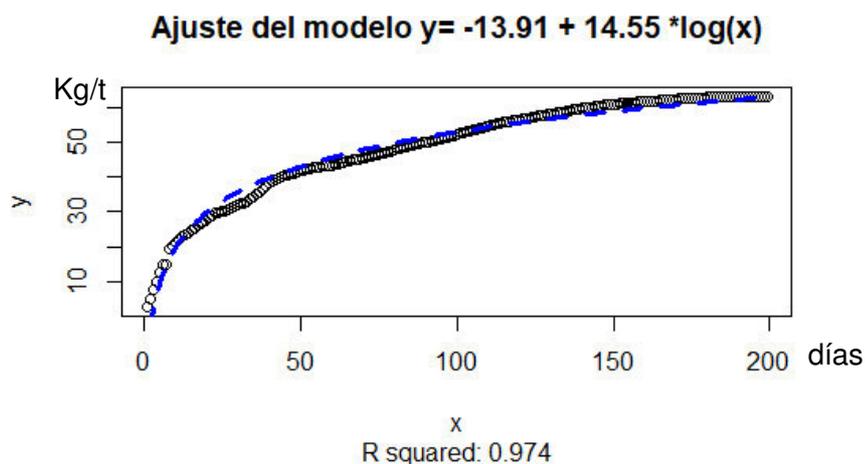


Figura 49 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L5 con 60% MOP. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones (ver Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y un $R^2= 0.974$. La ecuación es $y= -13,91+14,55\cdot\log(x)$, como se muestra en la Figura 49. En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación del lisímetro L6 (60% MOP)

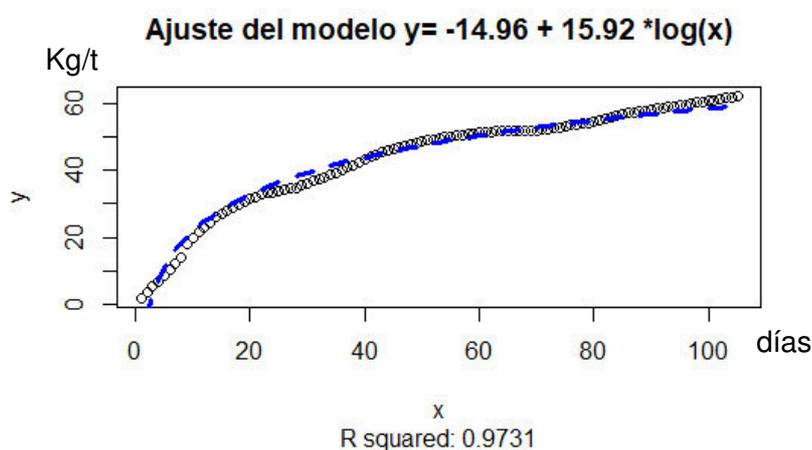


Figura 50 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L6 con 60% MOP. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones (Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y $R^2=0.9731$. La ecuación es $y= -14,96+15,92\cdot\log(x)$, como se muestra en la Figura 50. En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación del lisímetro L12 (60% MOP)

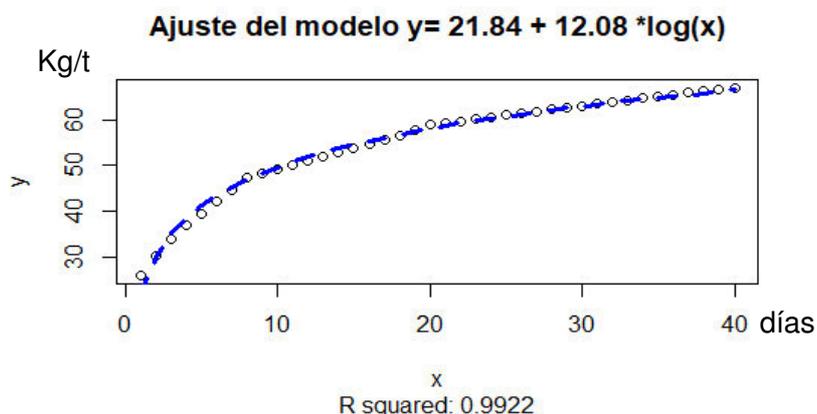


Figura 51 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L12 con 60% MOP. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones (ver Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $\rho = 2.2e-16$ y $R^2 = 0.9922$. La ecuación es $y = 21,84 + 12,08 \cdot \log(x)$, como se muestra en la Figura 51. En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación lisímetro TQ6 (60% MOP)

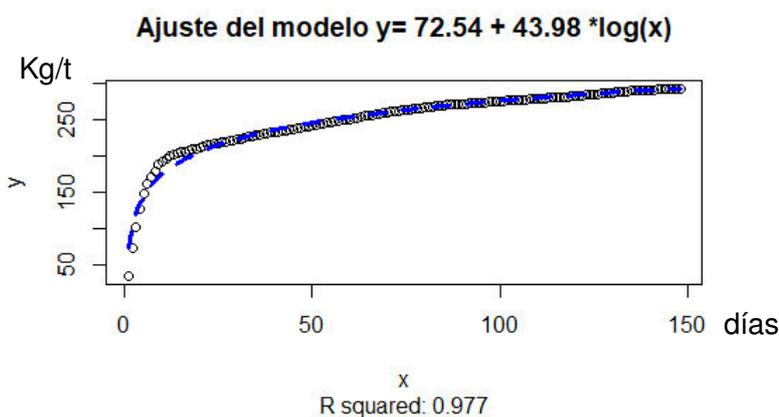


Figura 52 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro TQ6 con 60% MOP. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones (ver Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $\rho = 2.2e-16$ y $R^2 = 0.977$. La ecuación es $y = 72,54 + 43,98 \cdot \log(x)$,

como se muestra en la Figura 52. En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación en lisímetros con 100% MOP

Modelación lisímetro L7 (100% MOP)

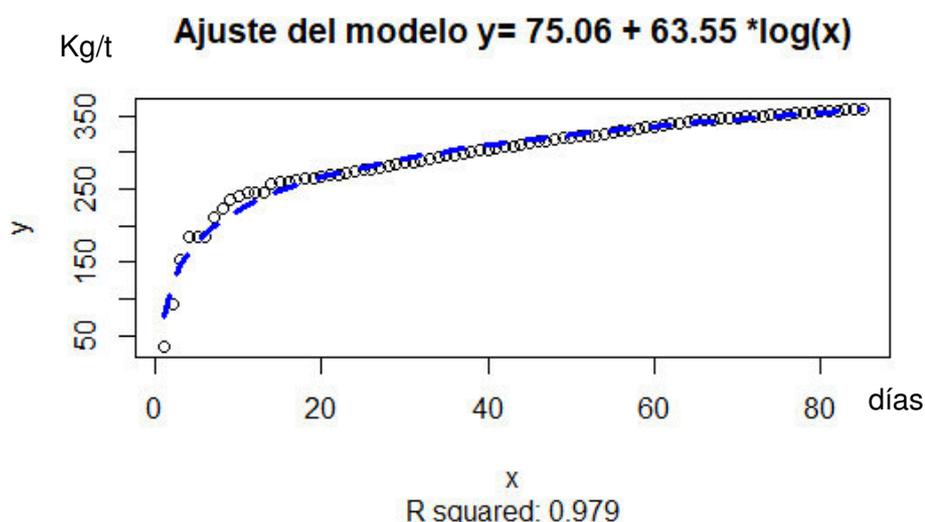


Figura 53 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L7 con 100% MOP. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones (ver Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y $R^2=0.979$. La ecuación es $y = 75,06 + 63,55 \cdot \log(x)$, como se muestra en la Figura 53. En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación lisímetro TQ1 (100% MOP)

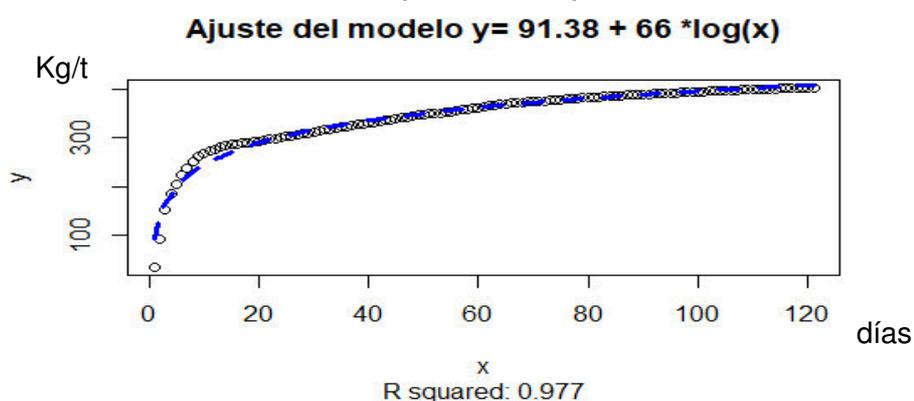


Figura 54 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro TQ1 con 100% MOP. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones (ver Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y $R^2=0.977$. La ecuación es $y= 91,38+66 \cdot \log(x)$, como se muestra en la Figura 54. En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación lisímetro TQ2 (100% MOP)

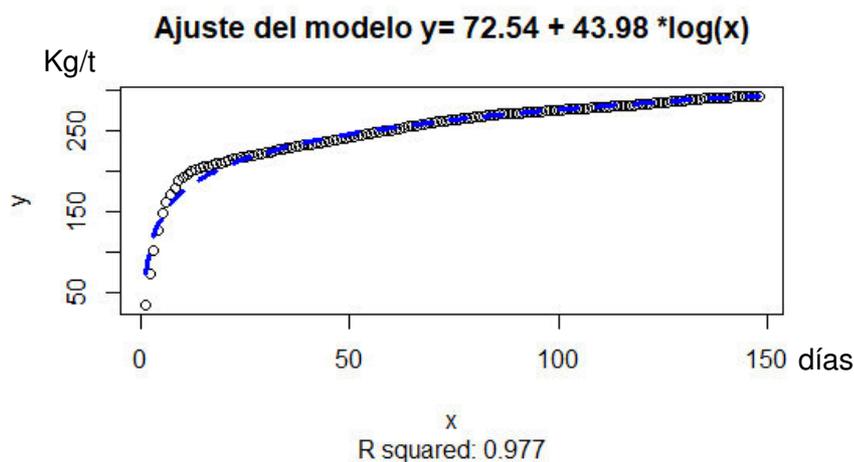


Figura 55 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro TQ2 con 100% MOP. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones (ver anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y $R^2=0.977$. La ecuación es $y= 72,54+43.98 \cdot \log(x)$, como se muestra en la Figura 55. En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación lisímetro L2 (100% MOP)

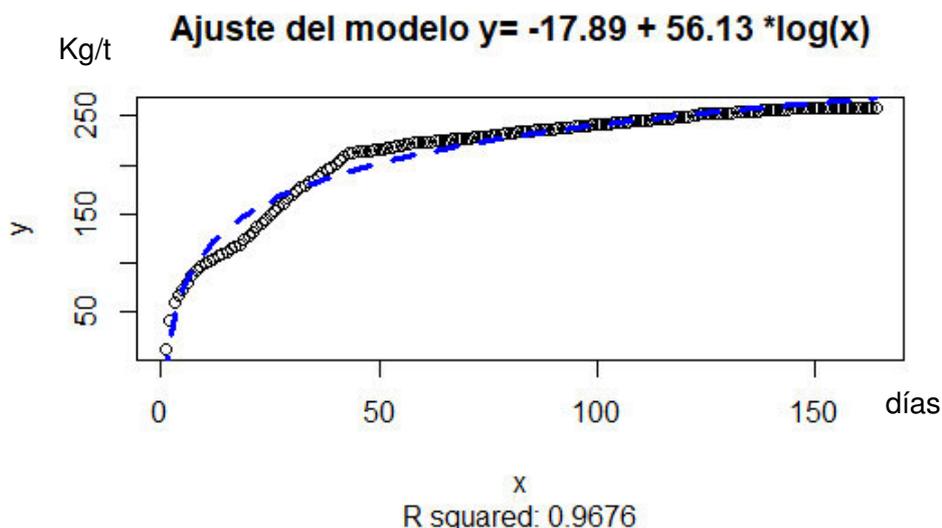


Figura 56 Modelación de la producción acumulada diaria de lixiviados en lisímetro L2 con 100% MOP. Elaboración propia

Una vez analizadas estas alternativas de ecuaciones (ver anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y $R^2=0.9676$. La ecuación es $y = -17,89+56,13 \cdot \log(x)$, como se muestra en la Figura 56. En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Entre las bondades de los métodos estadísticos está el que se pueden hacer inferencias sobre los datos colectados durante una prueba científica o de laboratorio, este tipo de pruebas sobre los datos pueden evidenciar tendencias ocultas dentro del conjunto de variables investigadas.

Las inferencias de tipo estadística pueden probar diferencias significativas entre muestras, diferencias significativas de variabilidad y hasta diferencias significativas entre correlaciones de variables (probar si dos conjuntos de variables siguen una misma tendencia o se diferencian).

Dado que los modelos determinísticos no dan opción para proyecciones de curvas ni tendencias, para efectos de comparar las tendencias de cada uno de los lisímetros, escogemos el modelo probabilístico (estadístico) para determinar las tendencias de producción acumulada.

Cuadro 39 Curva de modelación de generación acumulada en 10 lisímetros

	$y=0$	$y=-24.5+9.86*\log(x)$	$y=-13.91+14.55*\log(x)$	$y=-14.96+15.92*\log(x)$	$y=21.84+12.08*\log(x)$	$y=5.38+17.56*\log(x)$	$y=75.06+63.55*\log(x)$	$y=91.38+66*\log(x)$	$y=72.54+43.98*\log(x)$	$y=-17.89+56.13*\log(x)$
DIA	L1 33% MOP	L3 50% MOP	L5 60% MOP	L6 60% MOP	L12 60% MOP	TQ6 60% MOP	L7 100% MOP	TQ1 100% MOP	TQ2 100% MOP	L2 100% MOP
1	-				21,84	5,38	75,06	91,38	72,54	
2	-				30,21	17,55	119,11	137,13	103,02	21,02
3	-		2,07	2,53	35,11	24,67	144,88	163,89	120,86	43,78
4	-		6,26	7,11	38,59	29,72	163,16	182,88	133,51	59,92
5	-		9,51	10,66	41,28	33,64	177,34	197,60	143,32	72,45
6	-		12,16	13,56	43,48	36,84	188,93	209,64	151,34	82,68
7	-		14,40	16,02	45,35	39,55	198,72	219,81	158,12	91,33
8	-		16,35	18,14	46,96	41,89	207,21	228,62	163,99	98,83
9	-		18,06	20,02	48,38	43,96	214,69	236,40	169,17	105,44
10	-		19,59	21,70	49,66	45,81	221,39	243,35	173,81	111,35
20	-	5,04	29,68	32,73	58,03	57,99	265,44	289,10	204,29	150,26
30	-	9,04	35,58	39,19	62,93	65,11	291,21	315,86	222,12	173,02
40	-	11,87	39,76	43,77	66,40	70,16	309,49	334,85	234,78	189,17
50	-	14,07	43,01	47,32	69,10	74,08	323,67	349,57	244,59	201,69
60	-	15,87	45,66	50,22	71,30	77,28	335,26	361,61	252,61	211,93
70	-	17,39	47,91	52,68	73,16	79,98	345,05	371,78	259,39	220,58
80	-	18,71	49,85	54,80	74,77	82,33	353,54	380,59	265,26	228,07
90	-	19,87	51,56	56,68	76,20	84,40	361,02	388,37	270,44	234,68
100	-	20,91	53,10	58,35	77,47	86,25	367,72	395,32	275,08	240,60
110	-	21,85	54,48	59,87	78,62	87,92	373,78	401,61	279,27	245,95
120	-	22,70	55,75	61,26	79,67	89,45	379,31	407,35	283,09	250,83
130	-	23,49	56,91	62,53	80,64	90,85	384,39	412,64	286,61	255,32
140	-	24,22	57,99	63,71	81,54	92,16	389,10	417,53	289,87	259,48
150	-	24,90	58,99	64,81	82,37	93,37	393,49	422,08	292,91	263,36
160	-	25,54	59,93	65,84	83,15	94,50	397,59	426,34	295,75	266,98
170	-	26,14	60,82	66,80	83,88	95,56	401,44	430,34	298,41	270,38
180	-	26,70	61,65	67,71	84,57	96,57	405,07	434,12	300,93	273,59
190	-	27,24	62,43	68,57	85,22	97,52	408,51	437,68	303,30	276,63
200	-	27,74	63,18	69,39	85,84	98,42	411,77	441,07	305,56	279,50
210	-	28,22	63,89	70,17	86,43	99,28	414,87	444,29	307,71	282,24
220	-	28,68	64,57	70,91	87,00	100,09	417,83	447,36	309,75	284,85
230	-	29,12	65,21	71,61	87,53	100,87	420,65	450,29	311,71	287,35
231	-	29,16	65,28	71,68	87,58	100,95	420,93	450,58	311,90	287,59
232	-	29,20	65,34	71,75	87,64	101,02	421,20	450,86	312,09	287,84

En el Cuadro 39, se presentan las curvas de modelación de generación acumulada diaria de lixiviados en los diez lisímetros (la tabla completa está en el Anexo 6). Estas representan composiciones de materia orgánica putrescible de 33%, 50%, 60% y 100%.

En la Figura 57, se grafican las ecuaciones de las curvas de modelación de generación acumulada diaria de lixiviados en los diez lisímetros. Esta representa composiciones de materia orgánica putrescible de 33%, 50%, 60% y 100%.

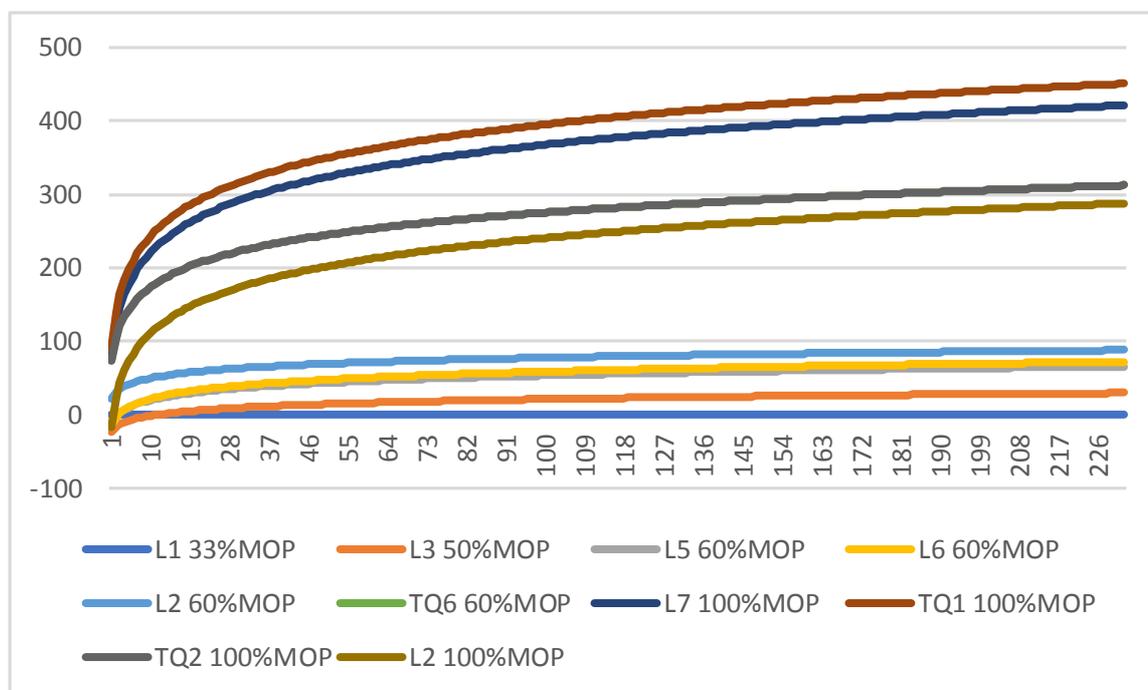


Figura 57 Modelación de generación acumulada promedio de lixiviados en lisímetros con 33%, 50%, 60% y 100% de materia orgánica putrescible.

En el Cuadro 40, se presenta un resumen de las curvas de tendencia de las cuatro combinaciones que generan lixiviados, esto es, 33%, 50%, 60% y 100% de MOP (la tabla completa está en el Anexo 6). De acuerdo a esta tabla, en 232 días, para el caso del 100% de MOP, se tiene una producción acumulada de 368 litros por tonelada; en el caso del 60% de MOP, se tienen 134 litros por tonelada; con 50% de MOP, se tienen 29 litros por tonelada; y el de 33% no genera lixiviados.

Cuadro 40 Resumen de las curvas de tendencia de la generación de lixiviados en 33%, 50%, 60% y 100% de MOP

Día	L1 33%MOP	L3 50%MOP	PROMEDIO LIX 60%MOP	PROMEDIO LIX 100%MOP
1	0	- 24.50	- 0.41	55.27
2	0	- 17.67	10.00	95.07
3	0	- 13.67	16.10	118.35
4	0	- 10.83	20.42	134.87
5	0	- 8.63	23.77	147.68
6	0	- 6.83	26.51	158.15
7	0	- 5.31	28.83	167.00
8	0	- 4.00	30.84	174.66
9	0	- 2.84	32.61	181.43
10	0	- 1.80	34.19	187.48
20	0	5.04	44.61	227.27
30	0	9.04	50.70	250.55
40	0	11.87	55.02	267.07
50	0	14.07	58.38	279.88
60	0	15.87	61.12	290.35
70	0	17.39	63.43	299.20
80	0	18.71	65.44	306.87
90	0	19.87	67.21	313.63
100	0	20.91	68.79	319.68
110	0	21.85	70.22	325.15
120	0	22.70	71.53	330.15
130	0	23.49	72.73	334.74
140	0	24.22	73.85	339.00
150	0	24.90	74.88	342.96
160	0	25.54	75.85	346.66
170	0	26.14	76.77	350.14
180	0	26.70	77.62	353.43
190	0	27.24	78.44	356.53
200	0	27.74	79.21	359.48
210	0	28.22	79.94	362.28
220	0	28.68	80.64	364.95
230	0	29.12	81.31	367.50
231	0	29.16	81.37	367.75
232	0	29.20	81.44	368.00

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 58, se grafican las curvas promedio de las modelaciones de generación acumulada diaria de lixiviados en lisímetros de 60% y 100% de materia orgánica putrescible, y las curvas de 33% y 50%.

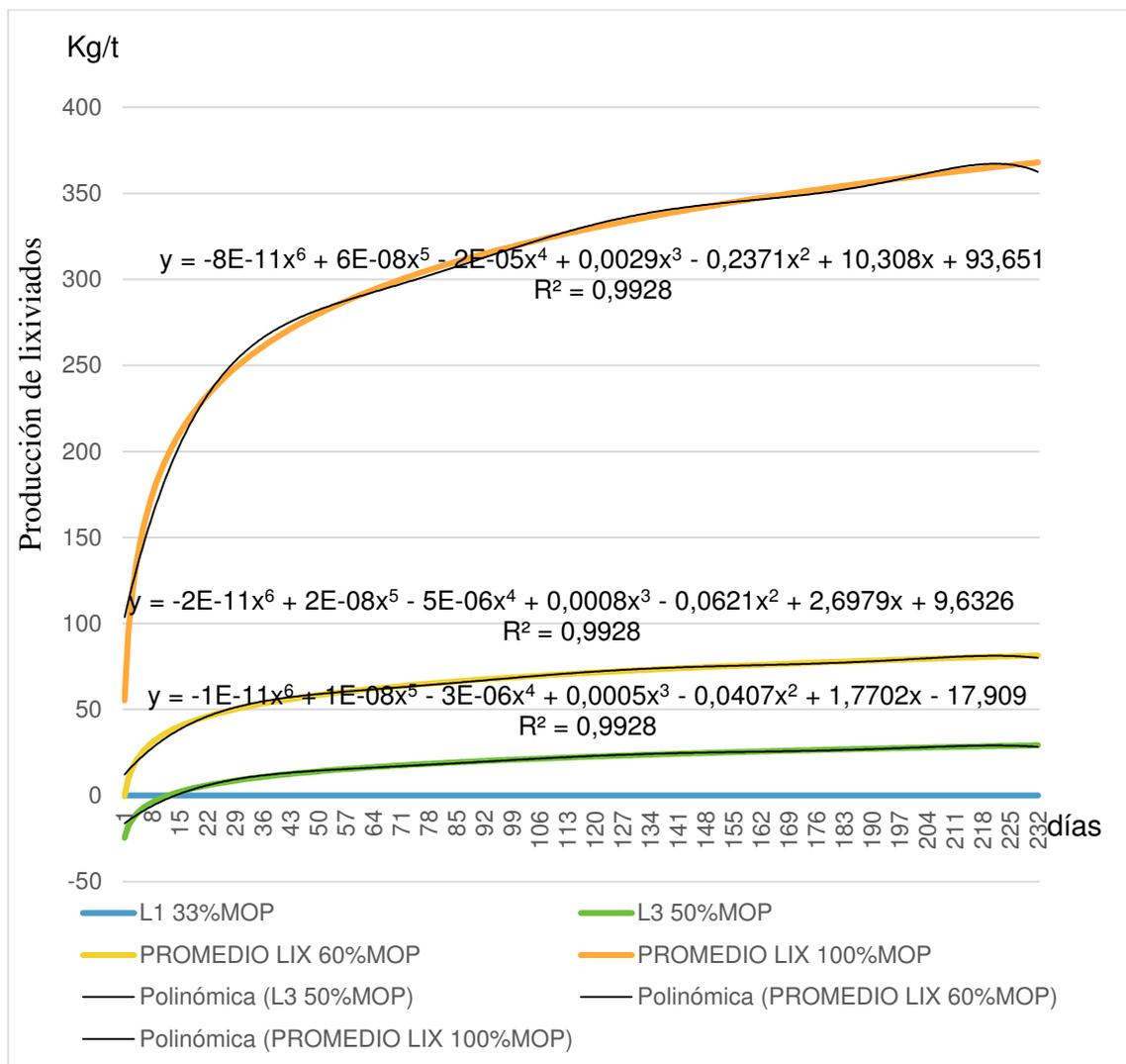


Figura 58 Modelación de generación acumulada promedio de lixiviados en lisímetros con 33%, 50%, 60% y 100% de materia orgánica putrescible.

4.1.4.3 Celdas “tipo” de RS

En la Figura 59, se aprecian los resultados de tres celdas con su producción de lixiviados. Se aprecia la influencia de las aguas lluvia en las celdas permeables. También se puede notar que, pasada la influencia de las aguas lluvia, la tendencia de producción de lixiviados se mantiene.

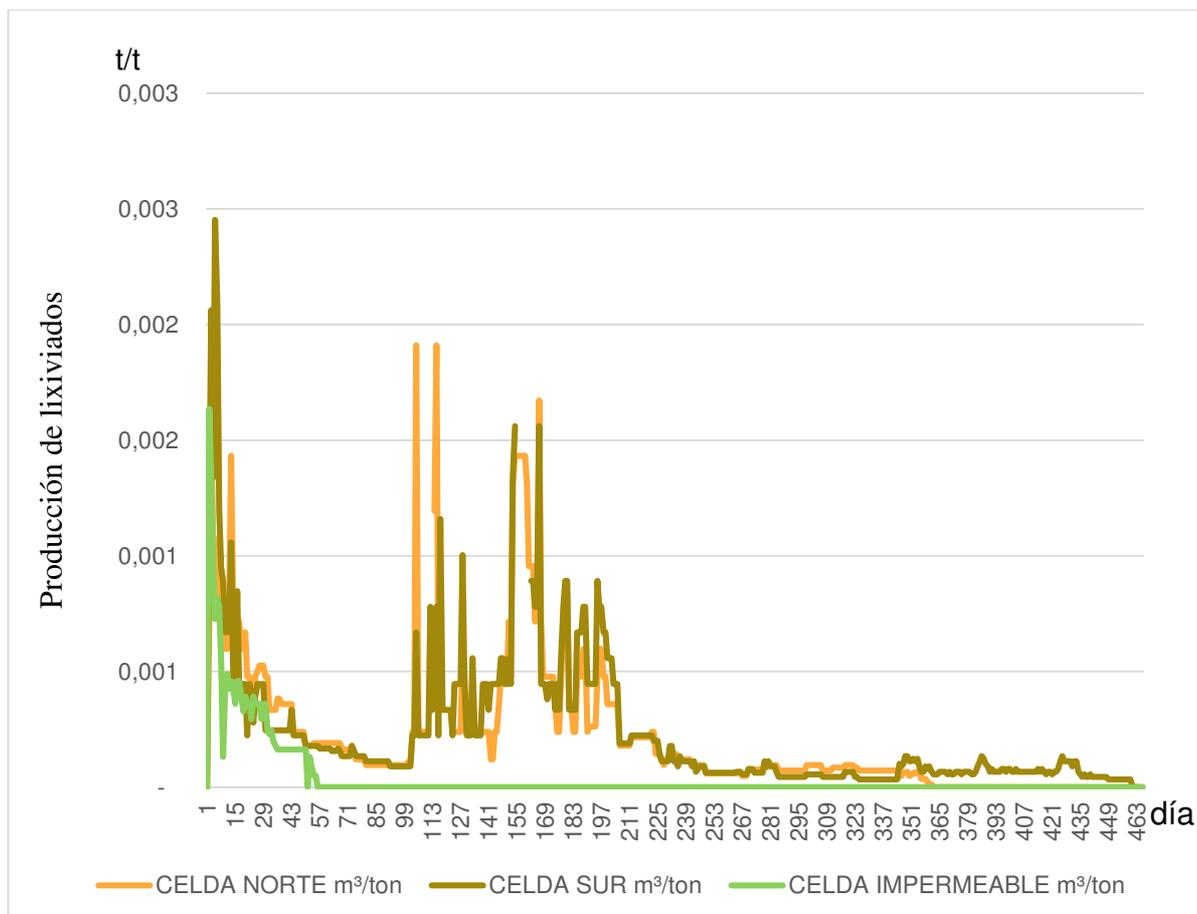


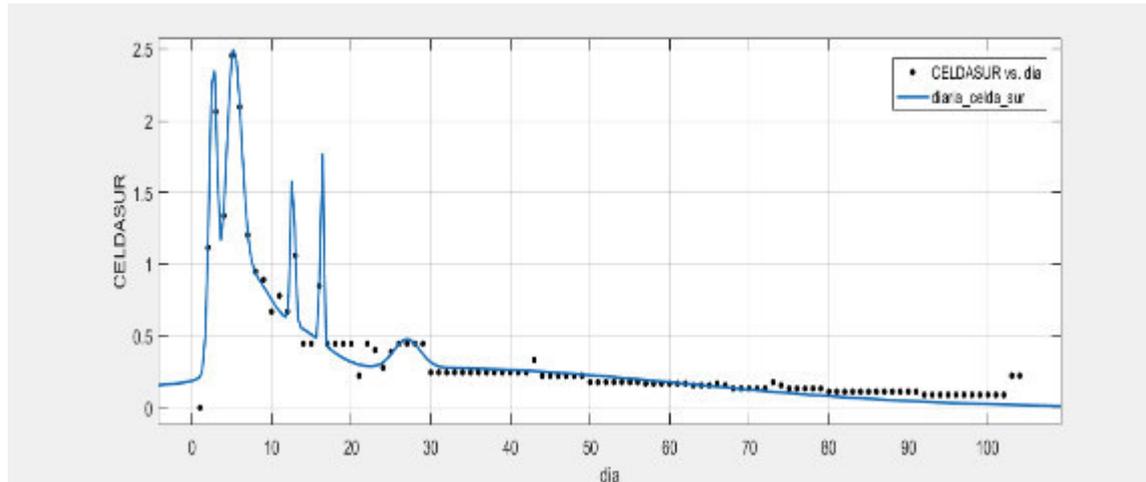
Figura 59 Producción de lixiviados en celdas “tipo” de RS en 460 días con influencia de aguas lluvias, tonelada de lixiviado/tonelada de RSU.

En la Figura 59, se ha rescatado solo el periodo inicial sin lluvias. Se demuestra que la máxima producción se da en los primeros 6 días, baja en forma gradual y significativa en 23 días más, y continúa con una producción decreciente.

MODELACION DETERMINISTICA DE GENERACIÓN DIARIA DE LIXIVIADOS EN CELDAS “TIPO”

A continuación se presentan las curvas de modelación de generación diaria de lixiviados en las celdas “tipo”

Celda sur



Modelo Gauss8:

$f(x) =$

$$a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) +$$

$$a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) +$$

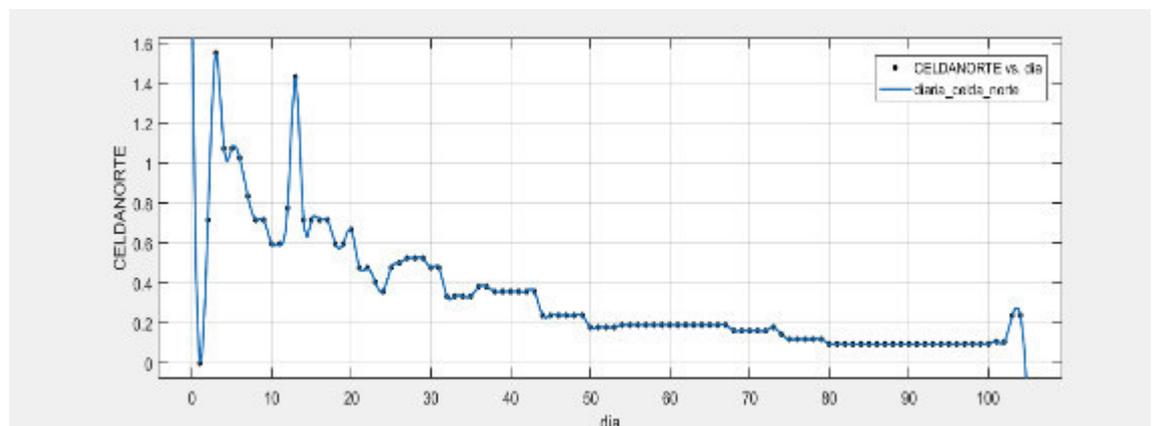
$$a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2) + a6 \cdot \exp(-((x-b6)/c6)^2) +$$

$$a7 \cdot \exp(-((x-b7)/c7)^2) + a8 \cdot \exp(-((x-b8)/c8)^2)$$

Coeficientes:

a1 =	113.1	c3 =	2.363	b6 =	16.2
b1 =	3.383	a4 =	0.903	c6 =	2.334
c1 =	0.3135	b4 =	21.24	a7 =	0.3381
a2 =	2.879	c4 =	1.461	b7 =	63.36
b2 =	5.14	a5 =	2.481	c7 =	1.233e+06
c2 =	1.483	b5 =	8.667	a8 =	0.1401
a3 =	40.06	c5 =	2.417	b8 =	48.81
b3 =	16.2	a6 =	-39.57	c8 =	9.763

Celda norte

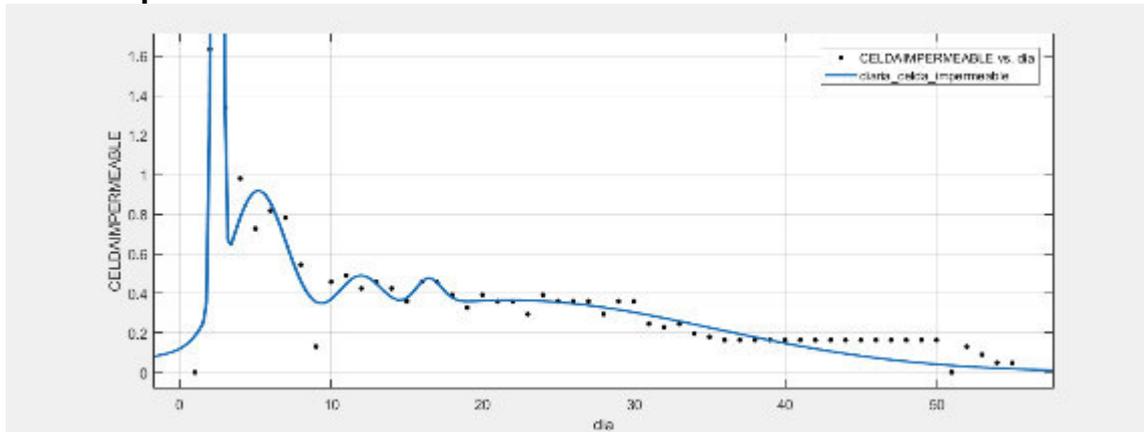


Modelo Gauss8:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2) + a6 \cdot \exp(-((x-b6)/c6)^2) + a7 \cdot \exp(-((x-b7)/c7)^2) + a8 \cdot \exp(-((x-b8)/c8)^2)$$

a1 =	0.8378	c3 =	3.312	b6 =	50.19
b1 =	2.754	a4 =	-8.438	c6 =	9.064
c1 =	0.7175	b4 =	-15.35	a7 =	0.06589
a2 =	0.8284	c4 =	11.59	b7 =	41.4
b2 =	12.86	a5 =	1.803e+13	c7 =	2.566
c2 =	0.6667	b5 =	-2745	a8 =	0.148
a3 =	0.7991	c5 =	495.2	b8 =	16.26
b3 =	4.035	a6 =	-0.06837	c8 =	2.944

Celda impermeable



Modelo Gauss5:

$$f(x) = a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2)$$

a1 =	13.19	a3 =	0.2099	a5 =	0.3653
b1 =	2.476	b3 =	11.84	b5 =	21.82
c1 =	0.3131	c3 =	2.038	c5 =	19.09
a2 =	0.7486	a4 =	0.1384		
b2 =	5.118	b4 =	16.43		
c2 =	2.703	c4 =	1.236		

Como se puede apreciar, para las tres celdas “tipo” el desarrollo de la producción diaria de lixiviados también converge en una distribución Gaussiana.

MODELACION PROBABILISTICA DE GENERACIÓN DIARIA DE LIXIVIADOS EN CELDAS “TIPO”

Al igual que con los lisímetros, se analizaron con el programa de software libre R (versión 3.4) las curvas de generación diaria de lixiviados en las celdas “tipo” de RS, con el fin de buscar si las curvas seguían una distribución F de Fisher, distribución Ji cuadrada o una distribución normal, pero los resultados fueron negativos en todos los casos; el programa arrojó curvas de funciones en x diferentes para diferentes rangos (ver Anexo 6).

Para el caso de generación acumulada de producciones diarias de lixiviados, se buscaron curvas de tendencias exponenciales y logarítmicas.

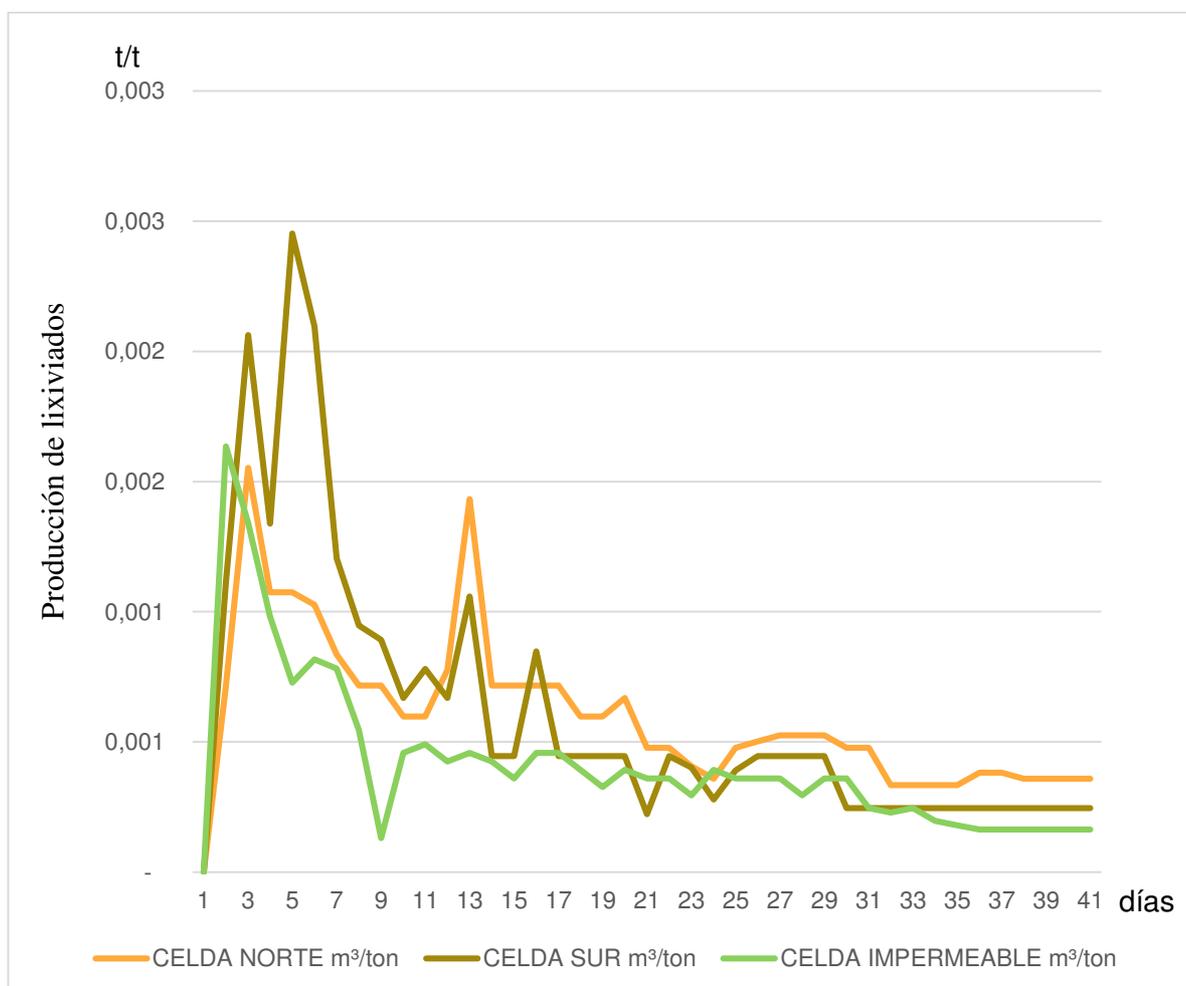


Figura 60 Producción de lixiviados en celdas “tipo” de RS en los primeros 40 días sin influencia de aguas lluvias, tonelada de lixiviado/tonelada de RSU.

Con la idea de tener gráficos con condiciones equivalentes en los volúmenes acumulados de producción de lixiviados en las celdas “tipo” de RS tanto permeables como impermeables, se estableció un periodo de 100 días iniciales sin lluvia (Figura 60). Para determinar la modelación de estas curvas se ha usado el mismo criterio que se usó para lisímetros y estudios de laboratorio, esto es buscar ecuaciones de curvas que cumplan con condiciones de Anova (análisis de la varianza) con valores de p menores al 0.05.

Modelación de celda (1) norte

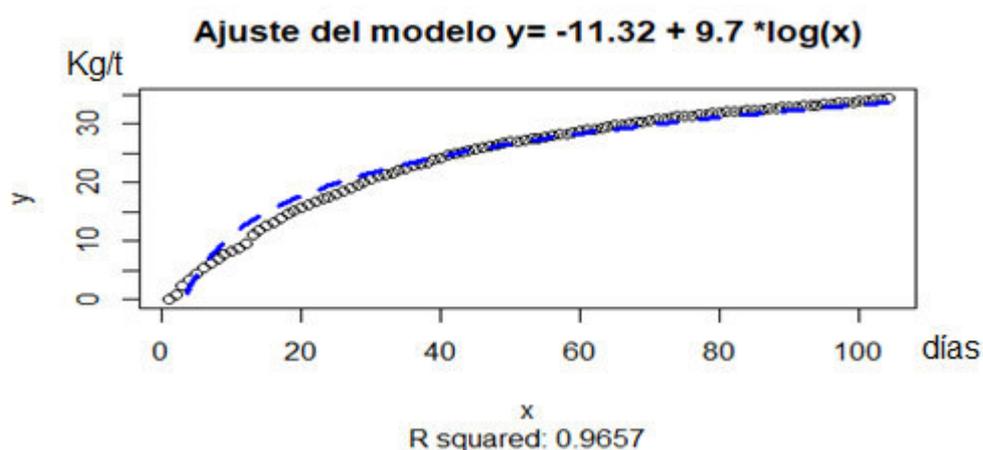


Figura 61 Modelación de la producción diaria acumulada en la celda norte sin influencia de aguas lluvias. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones de producción diaria acumulada de lixiviados en la celda norte (ver Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p = 2.2 \times 10^{-16}$ y cuya ecuación tiene un valor de $R^2 = 0.9657$. La ecuación es $y = -11.32 + 9.70 \cdot \log(x)$ (Ver Figura 61). En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación celda (2) sur

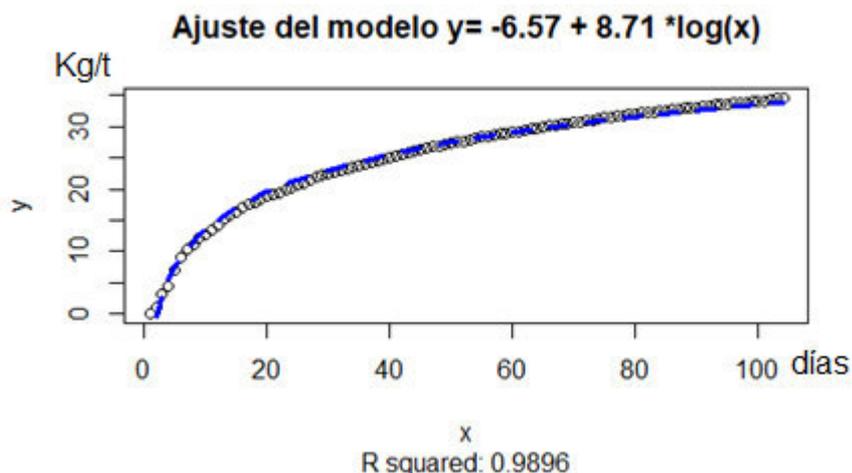


Figura 62 Modelación de la producción diaria acumulada en la celda sur sin influencia de aguas lluvias. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones de producción diaria acumulada de lixiviados en la celda sur (ver Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y cuya ecuación tiene un valor de $R^2 = 0.9896$. La ecuación es $y = -6,57+8,71 \cdot \log(x)$ (ver Figura 62). En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Modelación celda (3) impermeable

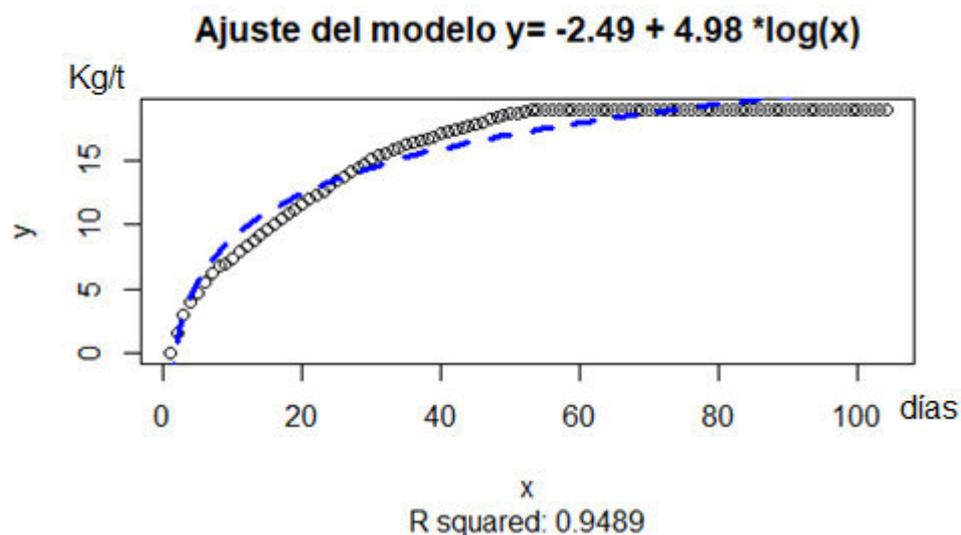


Figura 63 Modelación de la producción diaria acumulada en la celda impermeable sin influencia de aguas lluvias. Elaboración propia

Una vez analizadas varias alternativas de ecuaciones de producción diaria acumulada de lixiviados en la celda impermeable (ver Anexo 6), se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y cuya ecuación tiene un valor de $R^2 = 0.9489$. La ecuación es $y= -2,49+4,98*\log(x)$ (ver Figura 63). En el programa de software libre R (versión 3.4), la expresión $\log(x)$ se refiere al logaritmo neperiano $\ln(x)$.

Al igual que en los lisímetros, para efectos de comparar las tendencias de las celdas “tipo”, escogemos el modelo probabilístico (estadístico) para determinar las tendencias de producción acumulada.

En el Cuadro 41, se encuentran las proyecciones de forma resumida de la modelación de la producción de lixiviados en las tres celdas “tipo” de RS (Anexo 6).

Cuadro 41 Resumen de proyección de modelación de la producción de lixiviados en celdas “tipo” de RS

	$y=-11.32+9.70*\log(x)$	$y=-6.57+8.71*\log(x)$	$y=-2.49+4.98*\log(x)$
DIA	CELDA NORTE	CELDA SUR	CELDA IMPERMEABLE
1	-11,32	-6,57	-2,49
2	-4,60	-0,53	0,96
3	-0,66	3,00	2,98
4	2,13	5,50	4,41
5	4,29	7,45	5,53
6	6,06	9,04	6,43
7	7,56	10,38	7,20
8	8,85	11,54	7,87
9	9,99	12,57	8,45
10	11,02	13,48	8,98
20	17,74	19,52	12,43
30	21,67	23,05	14,45
40	24,46	25,56	15,88
50	26,63	27,50	16,99
60	28,40	29,09	17,90
70	29,89	30,43	18,67
80	31,19	31,60	19,33
90	32,33	32,62	19,92
100	33,35	33,54	20,44
110	34,27	34,37	20,92
120	35,12	35,13	21,35
130	35,90	35,83	21,75
140	36,61	36,47	22,12
150	37,28	37,07	22,46
160	37,91	37,63	22,78
170	38,50	38,16	23,09
180	39,05	38,66	23,37
190	39,58	39,13	23,64
200	40,07	39,58	23,90
210	40,55	40,00	24,14
220	41,00	40,41	24,37
230	41,43	40,79	24,59
231	41,47	40,83	24,61
232	41,51	40,87	24,63

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 64, se grafican los datos del Cuadro 43 del resumen de proyección de modelación de la producción de lixiviados en tres celdas “tipo” de RS, proyectado a 232 días.

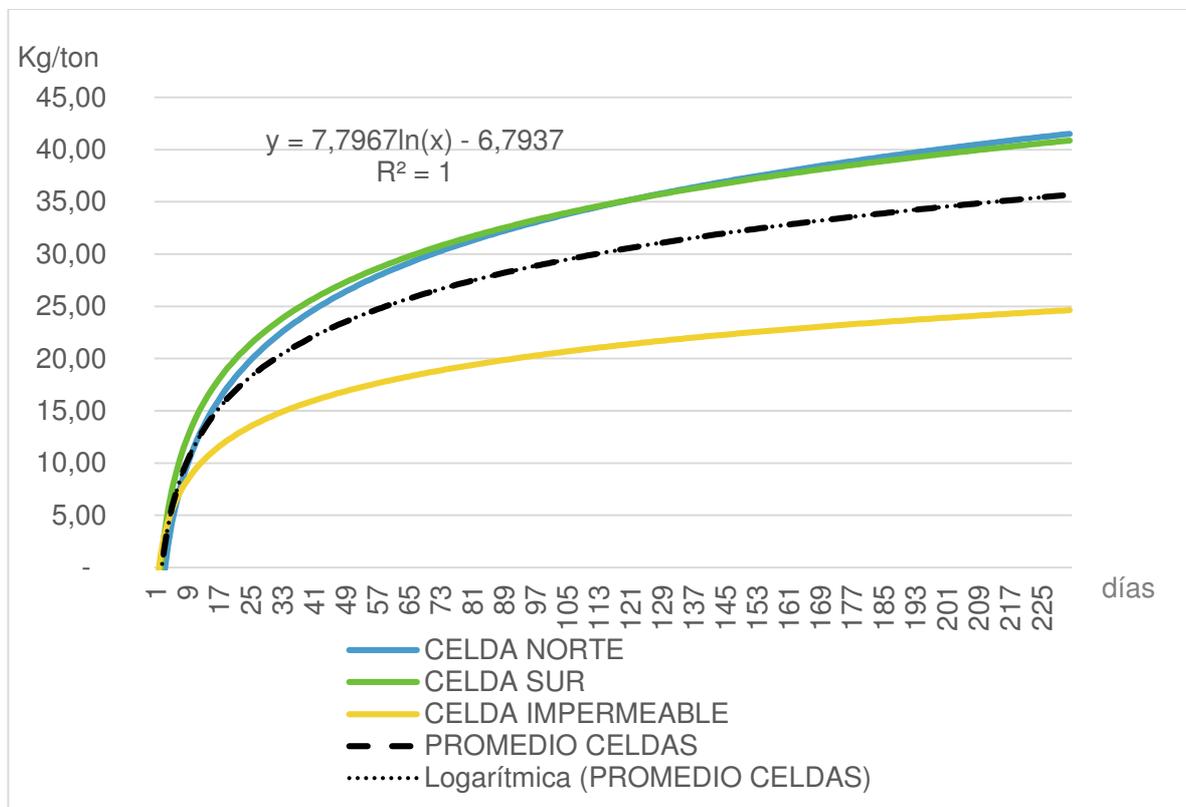


Figura 64 Volumen acumulado diario proyectado de lixiviados en celdas “tipo” de RS, días sin influencia de aguas lluvias. Elaboración propia

Como se aprecia en la Figura 64, los volúmenes máximos de lixiviados que producen las celdas están entre el 2.4% y el 4.1% de la masa de los RSU. Los resultados de la celda impermeable son similares a los generados en el sector D del RS Las Iguanas antes de presentarse la influencia de las aguas lluvias (22.58 Kg/t).

4.1.4.4 Comparativo de curvas de producción de lixiviados

En la Figura 65, se presentan las curvas de producción y modelación de laboratorio con MGFRS (combinada aerobio – anaerobio), lisímetros “escala

piloto” de RS (con 60% MOP) y celdas “tipo” de RS (3) y los registros de los tres sectores del RS Las Iguanas. Se observa que los resultados de laboratorio coinciden con las producciones de los lisímetros; de igual forma los resultados de las celdas “tipo” coinciden con los registros del relleno sanitario; los dos rangos de valores tienen una diferencia de alrededor del 60% que se atribuye a la presencia de plásticos, tierra y otros materiales que retienen los líquidos.

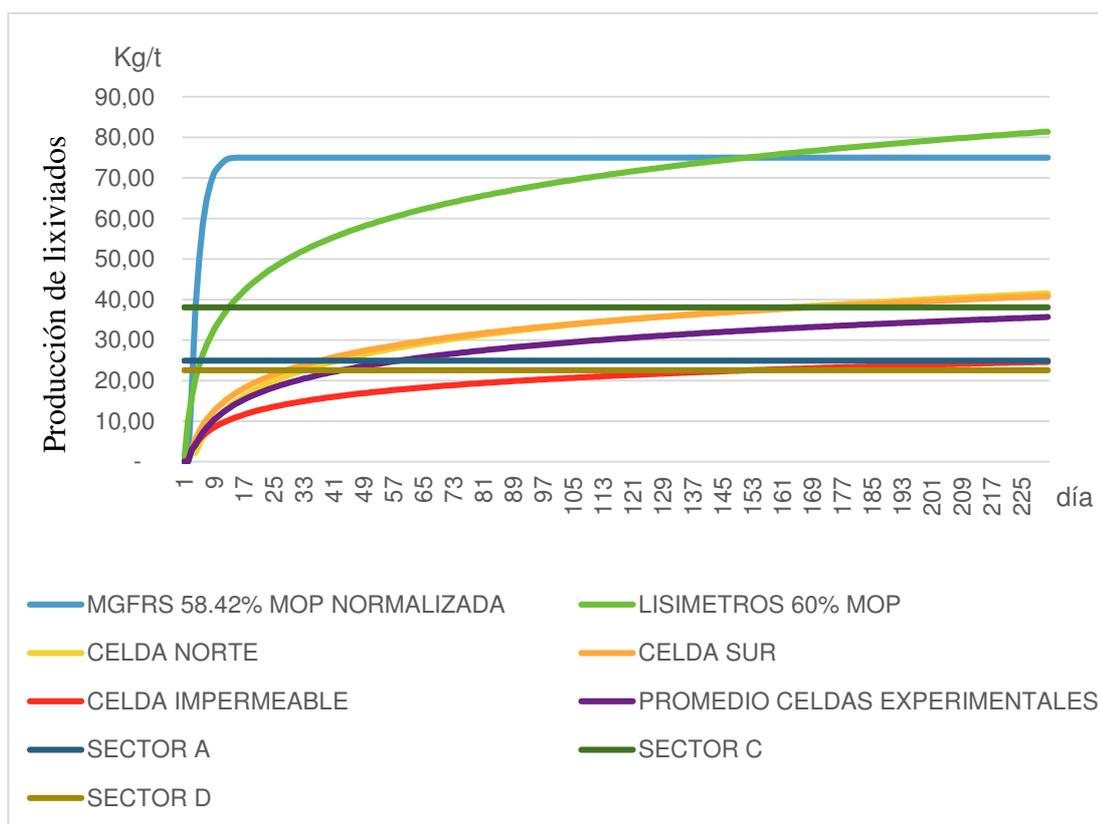


Figura 65 Comparación de modelación de volúmenes acumulados de producción de lixiviados en muestras normalizadas de laboratorio, celdas “tipo” de RS y lisímetros de “escala piloto” de RS con 60% MOP, y registros del relleno sanitario Las Iguanas. Elaboración propia

4.1.4.5 Modelación de producción de lixiviados que se generan en los componentes putrescibles de los RSU de Guayaquil

La modelación de la producción diaria acumulada de lixiviado se expresa en la ecuación de la combinación del proceso MGFRS aerobio – anaerobio normalizado que se mostró en la Figura 43, la misma que tiene un $R^2=0.9639$:

$$y = 5E-09x^5 - 9E-07x^4 + 6E-05x^3 - 0,0017x^2 + 0,0239x - 0,0459$$

Esta ecuación tiene carácter de única y su aplicación está condicionada a la caracterización de la materia orgánica de los RSU y a la no influencia de aguas lluvias o lodos. El método establecido para determinar los valores de producción de lixiviados, que consiste en aplicar el método MGFRS para cada uno de los componentes orgánicos putrescibles en condiciones aerobias y anaerobias hasta que cese la generación de lixiviados, luego combinarlos en la proporción de cada componente, considerando la frecuencia de recolección de los RSU y el tiempo de cobertura de los mismos, en el caso que sea un relleno sanitario, teniendo en consideración que el paso de aerobio a anaerobio es sobre los saldos de masa de cada componente.

El resultado de la ecuación determinarán el máximo valor de producción de lixiviados, el mismo que se vería afectado en un 60% si la costumbre del sector que se investiga utiliza bolsas plásticas para depositar los desechos.

Para proyectar el modelo anterior en un relleno sanitario, se puede asumir que, las celdas diarias son iguales, por tanto, la generación de lixiviados será igual en cada celda, y la generación total de lixiviados del relleno sanitario, será la suma de la generación diaria de todas las celdas.

Cuadro 42 Generación diaria de lixiviados en relleno sanitario.

	CELDA 1	CELDA 2	CELDA 3	CELDA 4	CELDA 5	CELDA 6	.....	CELDA n	GENERACIÓN DE LIXIVIADOS
DÍA 1	GD1 ₁								GT1 = GD1 ₁
DÍA 2	GD2 ₁	GD1 ₂							GT2 = GD2 ₁ + GD1 ₂
DÍA 3	GD3 ₁	GD2 ₂	GD1 ₃						GT3 = GD3 ₁ + GD2 ₂ + GD1 ₃
DÍA 4	GD4 ₁	GD3 ₂	GD2 ₃	GD1 ₄					GT4 = GD4 ₁ + GD3 ₂ + GD2 ₃ + GD1 ₄
DÍA 5	GD5 ₁	GD4 ₂	GD3 ₃	GD2 ₄	GD1 ₅				GT5 = GD5 ₁ + GD4 ₂ + GD3 ₃ + GD2 ₄ + GD1 ₅
DÍA 6	GD6 ₁	GD5 ₂	GD4 ₃	GD3 ₄	GD2 ₅	GD1 ₆			GT6 = GD6 ₁ + GD5 ₂ + GD4 ₃ + GD3 ₄ + GD2 ₅ + GD1 ₆
DÍA 7	GD7 ₁	GD6 ₂	GD5 ₃	GD4 ₄	GD3 ₅	GD2 ₆	.....	.....	GT7 = GD7 ₁ + GD6 ₂ + GD5 ₃ + GD4 ₄ + GD3 ₅ + GD2 ₆ + GD1 ₇
DÍA 8	GD8 ₁	GD7 ₂	GD6 ₃	GD5 ₄	GD4 ₅	GD3 ₆	.....	.....	GT8 = GD8 ₁ + GD7 ₂ + GD6 ₃ + GD5 ₄ + GD4 ₅ + GD3 ₆ + GD2 ₇ + GD1 ₈
DÍA 9	GD9 ₁	GD8 ₂	GD7 ₃	GD6 ₄	GD5 ₅	GD4 ₆	.....	.....	GT9 = GD9 ₁ + GD8 ₂ + GD7 ₃ + GD6 ₄ + GD5 ₅ + GD4 ₆ + GD3 ₇ + GD2 ₈ + GD1 ₉
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
DÍA n								GDn _n	GTn = GDn ₁ + + GD3 _(n-3) + GD2 _(n-1) + GD1 _n

Fuente: Elaboración propia

Del cuadro 42, considerando que:

$$GDn_1 = GDn_2 = GDn_n \quad \text{Ec. 07}$$

obtenemos la ecuación:

$$GTn = \sum_{n=1}^n GDn \quad \text{Ec. 08}$$

En donde:

GDn_n = generación del día n de la celda diaria n

GTn = generación total de lixiviados en el relleno sanitario en el día n

Como se puede observar, la ecuación de generación diaria total de lixiviados en un relleno sanitario es igual a la ecuación de generación acumulada diaria de lixiviados para una celda, esto explica el por qué la generación diaria llega a un valor máximo equivalente al volumen acumulado de generación de lixiviados de una celda y se mantiene con ese valor mientras se siga incrementando el número de celdas del relleno sanitario.

4.1.5 Discusión de resultados

Gran parte de la literatura sobre producción de lixiviados hace referencia a experiencia en los países industriales donde el porcentaje de materia orgánica en los RSU es muy bajo y los rellenos sanitarios no generan lixiviados sin adición de agua (lodos y lluvias) (método Suizo, Orht 1981, Eva Röben 2002, etc.); otros autores en sus métodos de cálculo de producción de lixiviados incluyen entre sus variables la descomposición de la materia orgánica, tal como el programa Help 3.07, que usando las proporciones de materia orgánica en los RSU de Guayaquil, arroja resultados mínimos o nulos, a diferencia del método de Tchobanoglous et. al., 1998 que presenta resultados muy altos (von Buchwald & Martínez , 2018) (numeral 4.1.4), igualmente Corenostós (Collazos 2011) (numeral 2.2.7) también con resultados altos, comparados con los que producen en el relleno sanitario de Guayaquil sin presencia de lluvias.

Sandra Cointreau (1982) presenta una relación inversamente proporcional entre condiciones económicas de las ciudades y el porcentaje de componentes orgánicos en los RSU (Cuadro 7), esto justifica la investigación de producción de lixiviados sin influencia de aguas lluvias.

Los alimentos a base de plantas tienen contenido de agua (humedad total) en un rango del 80 al 92% (Khan, et. al, 2016), cuando estos componentes aparecen en los RSU, producto de su descomposición, se espera que contribuyan significativamente en la generación de lixiviados (Grugnaletti, et. al, 2016). El contenido líquido de estos componentes se puede liberar mediante calor que induce gradientes que impulsan la transferencia interna del agua fuera del material por difusión, capilaridad y flujo de filtración por complejos procesos de evaporación, condensación (Srikiatden & Roberts, 2007). Esto significa que la expectativa de producción de lixiviados para un 60% de MOP es de 48 - 55%, sin embargo en el relleno sanitario de Guayaquil, se obtuvo alrededor del 3% lo que demuestra que no todo el líquido contenido en la materia orgánica se convierte en lixiviado.

Los métodos que consideran la materia orgánica como una fuente de producción de lixiviados se basan en la “humedad total”, generalmente calculada en laboratorio mediante ensayos de “desección” (Standard methods 2540B, desarrollado en 24 horas a 103 grados centígrados), cuya inaplicabilidad se demostró en el párrafo anterior, por lo que no habiéndose encontrado un método que represente esta condición, se desarrollaron métodos gravimétricos por filtración en laboratorio replicando el proceso que incurren los residuos desde su disposición, recolección desde de los domicilios hasta el relleno sanitario y su evolución en el mismo (MGFRS) con variables de temperatura en medios aerobios y anaerobios; la comparación de estos métodos con el de desecación se encuentra en el Cuadro 32; los resultados de estos métodos difieren de la desecación además de tiempo y volumen de lixiviados, en gases y vapor.

La temperatura de los procesos descomposición de los residuos de acuerdo a Kiss & Encarnación (2006) medio aerobio está entre 50-70°C y en medio anaerobio entre 35-50°C; sin embargo en el relleno sanitario de Guayaquil se ha determinado que la temperatura máxima de los RSU en los recolectores

es de 35°C (condición aerobia), y en el interior del relleno sanitario las temperaturas máximas medidas en los piezómetros es de 50°C (condición anaerobia). Los ensayos MGFRS se desarrollaron a 50°C y luego se hicieron comparaciones en condición aerobia a 35°C, encontrándose resultados similares.

La descomposición de la materia orgánica según Srikiatden & Roberts (2007), puede liberar líquido mediante un proceso complejo de evaporación y secado por condensación que se acopla mediante la transferencia de calor e induce gradientes que impulsan la transferencia interna del agua fuera del material por difusión, capilaridad y flujo de filtración, condiciones que el método de desecación no las puede discriminar.

Los tres métodos desarrollados en laboratorio tienen diferentes resultados, en la desecación se deshidrata la materia orgánica a 103°C en 24 horas, produciendo solo vapor y gas (no líquido); en el proceso aerobio, a 35-50°C en 5 días promedio, se genera líquido, vapor y gas; y en el proceso anaerobio, en 25 días promedio, se producen líquido (en mayor volumen, producto de la licuación del vapor por temperatura a 50°C) y gas. En los tres métodos de laboratorio, la masa remanente de MOP es alrededor del 20%, coincidencia que demuestra que no hay más descomposición de la materia orgánica.

Para determinar la producción de lixiviados aplicando los métodos de laboratorio se utilizaron componentes orgánicos frescos o recién dispuestos, y dado que las caracterizaciones de los RSU se las hace en el relleno sanitario después del proceso de dos días de recolección y transporte para luego ser dispuestos y cubiertos en la celda al tercer día, se asume que en los tres primeros días la descomposición de la MOP se desarrolla en medio aerobio y a partir del cuarto día con la masa remanente la descomposición cumple un proceso anaerobio (ver numeral 4.1.4.1.3), el que se puede apreciar en la figura 66.

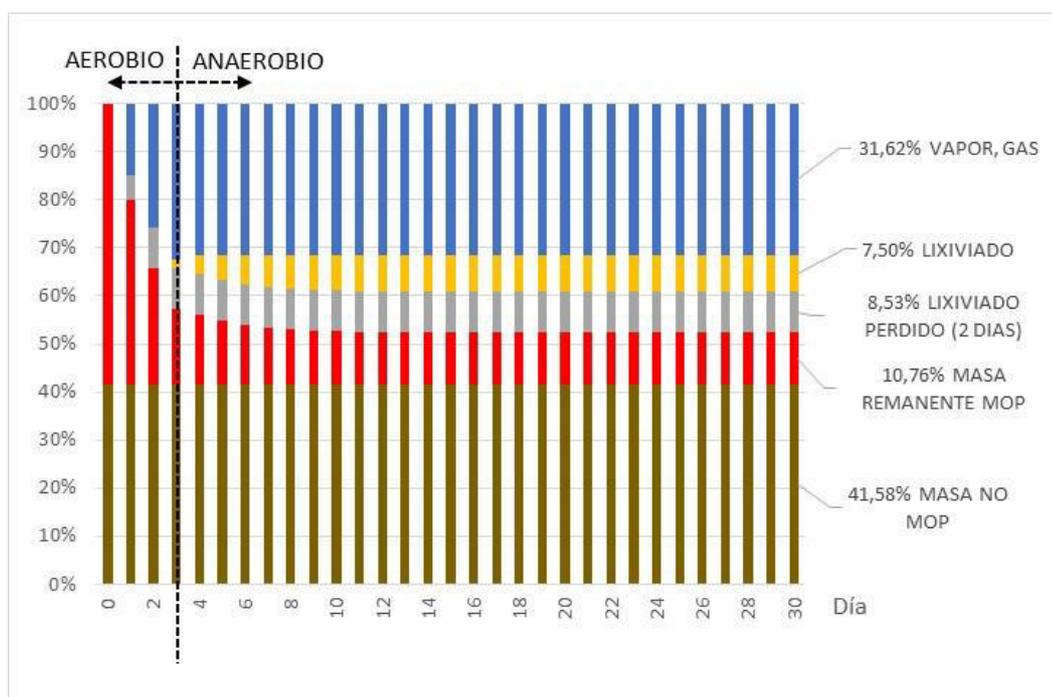


Figura 66 Combinación de procesos aerobio y anaerobio para determinar la curva de producción de lixiviados con 58.42% MOP. Elaboración propia

Es bien conocido el alto riesgo de contaminación de los acuíferos por los lixiviados generados por los RSU, autores como Tchobanoglous (1998), Kiss & Encarnación (2006), establecen rangos de composición de los lixiviados clasificándolos en vertederos nuevos (menos de 2 años) y maduros (más de 10 años); los nuevos con pH ácido, DBO entre 2000 y 30000 mg/l, DQO entre 3000 y 60000 mg/l, etc, los maduros con pH entre neutro y básico, DBO entre 100 y 200 mg/l, DQO entre 100 y 500 mg/l, etc. En el laboratorio se analizaron los lixiviados obtenidos del proceso aerobio (a los cuatro días) con resultados mayores a los de vertederos nuevos de Tchobanoglous, pH ácido, DBO 40500 mg/l, DQO 94500 mg/l, etc, y para el proceso anaerobio (a los siete días), pH neutro, DBO 2500 mg/L, DQO 5900 mg/l, etc., valores que son semejantes a los que se dan en el relleno sanitario de Guayaquil, con más de 10 años, en consecuencia lo afirmado por Tchobanoglous en cuanto a la madurez del relleno sanitario, no corresponde ya que los resultados dependen de la condición del proceso de descomposición (aerobio o anaerobio), es más la materia orgánica termina su descomposición anaerobia en 25 días promedio y no en más de 10 años

Es común el criterio que los asentamientos en los rellenos sanitarios, producto de la pérdida de líquidos y gases, puede llegar al 30% - 40% (Tchobanoglous 1998), esta investigación demuestra que puede acercarse al 50% (80% pérdida promedio de masa) si la composición de los RSU tiene alrededor de un 60% de MOP.

4.2 Pruebas de hipótesis

Si bien la hipótesis general de modelar las tendencias de producción de lixiviados de los residuos sólidos en laboratorio, lisímetros y celdas “tipo” se cumplieron en totalidad, sus resultados demuestran variaciones por los diferentes niveles de retención en las muestras, manteniendo siempre la misma tendencia de curvas de modelación.

La hipótesis del mayor elemento en la caracterización de los residuos sólidos urbanos de Guayaquil corresponde a cítricos y restos de plátano verde se ratifica y su presencia es fácilmente visible, condición que no es común en rellenos sanitarios de otras regiones y su descomposición se da en los niveles máximos en los primeros 15 días en condiciones anaerobias.

Se hicieron dos pruebas de hipótesis. La primera se refiere a la normalidad de la tendencia de distribución de las muestras de los componentes de los RSU de Guayaquil y la segunda, a la variación entre los resultados de los ensayos en laboratorio medidos en triplicados, considerando una curva adicional como promedio de los resultados de cada elemento.

$H_0: \mu = \mu_0$

$H_1: \mu \neq \mu_0$

Para un nivel de confianza del 95%, $Z < 1.96$.

Estadístico de la prueba: $(\bar{x} - \mu) / (\sigma / \sqrt{N})$

\bar{x} = media aritmética

μ = dato a analizar

σ = desviación estándar

N = número

En el primer caso, para el análisis de la distribución de las muestras aleatorias para determinar su distribución normal, se usó el programa de software libre R (versión 3.4), para validar los resultados se considera como hipótesis nula cuando sus resultados μ son iguales a la media aritmética μ_0 y la hipótesis alterna, que no los son $\mu \neq \mu_0$ en un intervalo de confianza del 95%. Se aceptaron como normales cuando el valor de p es mayor a 0,05. Se demostró que, para la caracterización de los RSU, solo 3 componentes inorgánicos y 5 orgánicos putrescibles tienen una distribución normal, pero estos componentes constituyen el 74.6% de la masa total.

Para el segundo caso, para validar los resultados de producción de lixiviados obtenidos en laboratorio, de cada una de las muestras de cada elemento de los RSU, bajo el supuesto de normalidad, planteamos una prueba de hipótesis estadística para la media al 95% de confianza, donde la hipótesis nula planteada es que la media μ es igual a un valor μ_0 y la hipótesis alterna es diferente a μ_0 . Si el estadístico de prueba es menor que 1.96, se acepta la hipótesis nula. Esto se cumplió en todos los casos, es decir, todos los ensayos desarrollados en laboratorio fueron validados (ver Anexo 3).

4.3 Presentación de los resultados

Es un criterio general, sobre todo en los países industrializados, el considerar que los rellenos sanitarios urbanos no producen lixiviados a menos que se adicione lluvia u otros volúmenes adicionales de líquidos. La investigación desarrollada en el relleno sanitario de Guayaquil indica que sí se producen lixiviados sin presencia de aguas lluvias.

Los lixiviados en concepto son producto de la descomposición de la materia orgánica o de adición de aguas, la adición de agua no es motivo de esta investigación. La proporción de la MOP en Guayaquil (60%) es similar a la de la mayoría de las ciudades de Latinoamérica cuyas condiciones económicas semejantes, aunque los componentes que constituyen la caracterización de sus residuos no sean iguales; la diferencia radica en las costumbres alimenticias, en Guayaquil y las ciudades aledañas, la alimentación está constituida mayoritariamente por carbohidratos, especialmente plátano (fruta

en la que la cáscara es el 40% de la masa), lo que incide en un 14.02%, o 18.6% de los componentes normalizados (N) (Cuadro 31) en la composición de los RSU, y su contenido de “humedad” es muy alto, generando lixiviados rápidamente.

La investigación que se desarrolló fue experimental y correlacional con la información existente, aunque los tamaños de las muestras para la caracterización desarrolladas por la operadora del RS Las Iguanas en los años 2012, 2016 y 2017 fueron mayores a las cantidades recomendadas por procedimientos internacionales, algunos de los componentes orgánicos que constituyen su caracterización fueron heterogéneos (no normales) debido a la estacionalidad.

Para modelar estadísticamente se utilizó el programa de software libre R (versión 3.4) para buscar una hipótesis nula de igualdades de medias aritméticas de las muestras, considerando un intervalo de confianza del 95%, resultando que los componentes que cumplen esta condición de normalidad son 10 de los 26 componentes, no obstante, constituyen más del 80% de la masa (Cuadro 31).

Para determinar la potencial producción de lixiviados, en el año 2016 se hizo una caracterización de los componentes de los RSU, definiéndose en total 26 (orgánicos e inorgánicos), adicionalmente se los clasificó en cinco estratos socioeconómicos. Se determinó que los componentes orgánicos altamente putrescibles (MOP) son mayoritariamente, cáscara de plátano verde (14.6%, N 18.6%), residuos de comida preparada (12.3%, N 16.3%) y cítricos (7.42%, N 9.9%) siendo el mismo orden en todos los estratos socioeconómicos, por lo que se puede aseverar que las costumbres alimenticias son similares en todos los guayaquileños (Cuadro 23). Los derivados de papel y cartón (8.71%, N 10.2%) se caracterizaron adicionalmente, encontrándose que en todos los sectores económicos predominan el cartón (3.2%), papel higiénico (2.1%) y papel periódico (2%) (Cuadro 29). Estos productos llegan saturados al relleno sanitario, y tienen capacidad de absorción de 45.9 Kg/t (Cuadro 29).

Adicionalmente se determinó que por adsorción se retienen 15 Kg/t de líquidos en los materiales no putrescibles (Cuadro 30).

Para determinar la producción de lixiviados en laboratorio, no se encontró un procedimiento oficial que replique las condiciones de la evolución que se desarrolla de los componentes de los RSU desde su generación, almacenamiento, traslado, y disposición final en el relleno sanitario, y los modelos que existen toman como base el “contenido de humedad” obtenido con el método estandarizado por desecación (SM 25540B) a 103°C, el que no diferencia proporciones de líquidos, vapor ni gases. En los productos normalizados al 58.42%, el “contenido de humedad” es 481.13 Kg/t (48%), sin determinarse cuánto de esto se convierte en lixiviados. Se desarrolló un método propio para representar en laboratorio, en una forma más fidedigna con las condiciones de un relleno sanitario, esto es 50°C (máxima temperatura registrada en piezómetros) en condición anaerobia, que se denominó método gravimétrico por filtración en condiciones de relleno sanitario (MGFRS) (Cuadro 34), al 58.42% MOP, se obtuvo como resultado una producción de lixiviado de 473.64 Kg/t (47%), con el proceso aerobio se determinó una producción de lixiviado de 107.66 Kg/t (11%), la diferencia con el peso inicial 584.2 Kg/t con el peso de los lixiviados generados por el proceso aerobio (107.66 Kg/t) y con el peso remanente 105.64 Kg/t nos da 370.91 Kg/t (37%) que es el vapor y gas, que se transforma en líquido al mantener condiciones anaerobias y temperatura de 50°C. La diferencia del peso del lixiviado en condición anaerobia y la masa remanente 2.96 Kg/t (0.3%) corresponde a gases. Con los 3 métodos los valores de masa remanentes, son prácticamente iguales (10.3%, 10.6% y 10.8%), o (10.3 del 58.42%) 17.6%, 18.1% y 18.4% de la MOP, esto demuestra que los valores remanentes son muy semejantes y se puede concluir que no hay más descomposición de la materia orgánica (Cuadro 34).

Usando el método MGFRS en el laboratorio, se determinó que en condición anaerobia la producción máxima se da en el día catorce (Figura 35) y en el proceso aerobio su máxima producción se dio el primer día (Figura 37).

Las muestras utilizadas para los tres métodos de laboratorio se tomaron de residuos frescos; para replicar las condiciones de los residuos que llegan al relleno sanitario de Guayaquil, se consideraron 2 días entre la generación, almacenamiento, recolección interdiaria y transporte en condición aerobia, el tercer día se esparcen los residuos y se cubren, también en condición aerobia, a partir del cuarto día, los residuos inician una condición anaerobia. Se combinaron 3 días de proceso aerobio MGFRS y con el saldo de masa remanente (al tercer día) se inició proceso anaerobio MGFRS. Para el cálculo de la producción acumulada de lixiviados no se consideraron los dos primeros días de proceso aerobio porque gran parte de los líquidos se pierden en la manipulación de recolección y transporte, otros quedan adsorbidos (15.6 Kg/t) (Cuadro 30) y absorbidos (45.9 Kg/t) (Cuadro 29), donde se obtuvo un curva con valores acumulados finales de 75 Kg/t (Figura 66).

En lisímetros se reprodujeron las composiciones de los RSU con varias combinaciones de MOP (33, 50, 60 y 100%) para determinar la producción de lixiviados cuyos volúmenes máximos se dieron en los primeros siete días y, a los quince días se descargó la mayoría de su producción. Los valores promedios para las condiciones de Guayaquil (60% MOP) guardan relación con los resultados obtenidos en laboratorio.

El lisímetro con 33% de materia orgánica putrescible nunca produjo lixiviados (Cuadro 39), lo que coincide con la experiencia en los países industriales y el cálculo de producción de lixiviados desarrollado por Tchobanoglous (von Buchwald & Martínez 2018), siendo la producción promedio de los lisímetros con 60% MOP de 81.44 Kg/t (Cuadro 40); si bien el contenido de MOP es similar al que se recibe en el relleno sanitario, a estos residuos se le extrajeron las fundas plásticas.

Los resultados de producción de lixiviados en las celdas “tipo” muestran que la máxima producción se da en los primeros 6 días, baja en forma gradual y significativa en 23 días más, luego continúa con una producción decreciente pero considerable hasta el día 51, totalizando en promedio 35.67 Kg/t (Figura 64). Está demostrado también que en la época de lluvias, hay un incremento

en proporción de su intensidad y, al finalizar la temporada, vuelve a la misma tendencia que tenía antes de la época lluviosa.

Los resultados de la combinación de los procesos aerobio y anaerobio (Figura 66) en laboratorio indican que la masa remanente queda constituida por 41.58% de los componentes no MOP (100 - 58.42) y 10.76% MOP, total 52.34%, es decir que la pérdida de masa es de 47.66%, desglosado en 31.62% vapor y gas, 7.50% lixiviado y 8.53% de lixiviado de los dos primeros días, estos líquidos iniciales se riegan sobre todos los componentes de los residuos, quedando 1.5% adsorbido en los materiales no MOP y 4.6% absorbidos en papel, cartón y derivados y un 2.4% perdidos en manipulación. Considerando que los lixiviados absorbidos por papel y cartón (4.6%) se descargan, van a incrementar la producción de lixiviados de la descomposición de la MOP, totalizando 12.1%, valor que guarda proporción con los resultados de los lisímetros al 60% MOP (8.1%) (Cuadro 40), en donde los materiales putrescibles están combinados con el resto de los componentes dando opción a mayores retenciones y más aún para las celdas “tipo” (3.6%) (Figura 64) y relleno sanitario (promedio de los 3 sectores del RS Las Iguanas, 2.9%) (Anexo 5), donde los niveles de retención son mayores principalmente debido a bolsas plásticas y materiales de cobertura.

La justificación de esta investigación se basó en el alto nivel de contaminación que los lixiviados producen al entrar en contacto con algún medio acuático, para cuantificarlo se hicieron los análisis físico-químicos para los lixiviados producidos en medios anaerobio y aerobio, encontrando como particularidades que las relaciones de DBO y DQO en los casos de los lixiviados producidos por proceso aerobio exceden más de 400 veces los límites de descarga a un cuerpo de agua (normas internacionales), en el caso de lixiviados producidos por proceso anaerobio excede en alrededor de 30 veces, en el caso de cobre es 1460 contra 16, en el caso de fósforo 167 contra 39, hierro 307 contra 2, etc. (Cuadro 37), esto demuestra que la descomposición de la materia orgánica en un medio aerobio (que se da en basurales o botaderos a cielo abierto) es mucho más contaminante que en un

medio anaerobio (que se da en rellenos sanitarios), a pesar de tener una relación de volumen 4 veces menor.

CONCLUSIONES

La modelación de la producción de lixiviados se da en la combinación del método MGFRS en condiciones aerobias y anaerobias de los componentes orgánicos putrescibles de los RSU de Guayaquil, reproduciendo las condiciones de generación, almacenamiento, traslado y disposición final en el relleno sanitario. La curva de modelación, se ajusta a un modelo polinómico basado en condiciones estocásticas, con un (coeficiente de determinación) $R^2 = 0,9639$, es la siguiente:

$$y = 5E-09x^5 - 9E-07x^4 + 6E-05x^3 - 0,0017x^2 + 0,0239x - 0,0459 \text{ (Figura 43)}$$

Los componentes que constituyen la materia orgánica representan el 70.38% de los RSU (peso húmedo), caracterizado en el relleno sanitario, desglosados en residuos orgánicos altamente putrescibles (MOP) (58.42%), papel y cartón (8.73%), y madera y plantas (3.24%). Los MOP, están constituidos por cítricos (7.44%), choclo (4.86%), restos de comida preparada (12.32%), restos de jardinería (4.55%), cáscara de plátano verde (14.02%), guaba (0.47%), cangrejo (0.30%), culantro (1.24%), coco (2.71%), concha (0.25%), sandía (1.11%), maracuyá (0.44%), lechuga (0.63%), piña (0.42%), mango (0.24%), yuca (1.25%), zapallo (0.72%), otros que no se pueden separar (5.47%) (Cuadro 31); la descomposición de estos componentes altamente putrescibles genera lixiviados aún sin presencia de lluvia.

Las curvas de producción de lixiviados de los componentes MOP normalizados medidos en laboratorio con condiciones similares al RS de Guayaquil, resultaron polinómicas con altos coeficientes de determinación (R^2), basados en condiciones estocásticas, tienen una producción acumulada mediante el método MGFRS de 473.64 Kg/t de lixiviados en condiciones anaerobias (incluido licuación de vapores), y 107.66 Kg/t en condiciones aerobias.

Ecuación MGFRS anaerobio normalizado ($R^2 = 0,9651$) (Figura 36)

$$y = 0,0087x^3 - 1,1293x^2 + 46,841x - 141,94$$

Ecuación MGFRS aerobio normalizado ($R^2 = 0,8958$) (Figura 38)

$$y = -5E-07x^6 + 9E-05x^5 - 0,007x^4 + 0,2586x^3 - 4,8186x^2 + 41,807x - 17,997$$

Las curvas de producción diaria en lisímetros con modelación determinística generalmente son gaussianas a excepción del lisímetro con 50% MOP (Figura 47), lo que determina que sus valores son los mínimos de producción de lixiviados. Las curvas promedio de producción acumulada de lixiviados en lisímetros con 50, 60 y 100% de MOP, que más se ajustaron a su tendencia son exponenciales, basadas en condiciones estocásticas, con altos coeficientes de determinación (R^2), y para la condición de 33% de MOP, no produjo lixiviados (Figura 58).

Ecuación lisímetro 50% MOP ($R^2 = 0,9928$)

$$y = -1E-11x^6 + 1E-08x^5 - 3E-06x^4 + 0,0005x^3 - 0,0407x^2 + 1,7702x - 17,909$$

Ecuación lisímetro 60% MOP ($R^2 = 0,9928$)

$$y = -2E-11x^6 + 2E-08x^5 - 5E-06x^4 + 0,0008x^3 - 0,0621x^2 + 2,6979x + 9,6326$$

Ecuación lisímetro 100% MOP ($R^2 = 0,9928$)

$$y = -8E-11x^6 + 6E-08x^5 - 2E-05x^4 + 0,0029x^3 - 0,2371x^2 + 10,308x + 93,651$$

La curva promedio para celdas se ajusta a un modelo logarítmico, en condiciones estocásticas (Figura 64):

Ecuación celdas “tipo ($R^2 = 1$)

$$y = 7,7967\ln(x) - 6,7937$$

Al comparar los resultados de las modelaciones de producción de lixiviados, encontramos que en los ensayos de laboratorio se obtienen los máximos valores al combinar los procesos aerobios y anaerobios considerando que en los primeros tres días se da un proceso aerobio para luego con esa masa remanente iniciar un proceso anaerobio (Figura 40); con estos valores se obtiene que la producción de lixiviados es el 7.5% de la masa (Figura 66); considerando que el líquido generado en dos días previos al ingreso de los

RSU al relleno sanitario se riega sobre todos los componentes entre ellos no MOP y en especial los derivados de papel y cartón, los que consiguen absorber un 4.6% (Cuadro 29), considerando también que esta absorción es temporal y finalmente descarga también lixiviados, por lo que la producción total de lixiviado suma 12.1% de la masa, que es la producción potencial medida en laboratorio.

La producción acumulada promedio de lixiviados obtenida en lisímetro con el 60% de MOP es 8.1% (Cuadro 40), con la presencia de todos los componentes, sin bolsas de plástico. En las celdas de 400 toneladas se recibieron los mismos residuos que ingresan al relleno sanitario con 60% de MOP sin extraer las bolsas de plástico, su producción de lixiviados en promedio llegó a valores de 3.6% (Figura 64), y en el relleno sanitario, con valores promedio de 2.9% (Anexo 5). Concluyéndose que gran parte de los lixiviados quedan retenidos entre sus componentes, las bolas de plástico y en los materiales de cobertura diaria (arcilla).

Entre los resultados más relevantes se puede destacar que los RSU de los países industrializados tienen poco contenido de MOP y la producción de lixiviados sin adición de lluvias o de lodos es mínima o nula, mientras que en países con condiciones económicas bajas, los RSU tienen altos contenidos de MOP y producen lixiviados sin adición de lluvias o lodos.

El método de desecación no determina si la pérdida de masa es lixiviado, vapor o gases, mientras que el método desarrollado MGFRS, tanto en condición aerobia como anaerobia, determina si es líquido, vapor o gases y su tiempo de producción.

Al comparar los resultados de los métodos tanto de desecación como MGFRS (aerobio – anaerobio) en función de la masa remanente, se encuentra una gran similitud, lo que valida que posterior a este desarrollo no hay más descomposición.

La combinación de los desarrollos MGFRS (aerobio y anaerobio) representa en mejor forma la ruta de la producción de lixiviados de los RSU, lo que permite pronosticar un valor de producción de lixiviado tanto en rellenos sanitarios como vertederos.

Los niveles de asentamientos de los rellenos sanitarios están relacionados directamente con la composición de MOP, por lo que la pérdida de volumen de la masa puede llegar hasta el 50%.

El método desarrollado (MGFRS, aerobio + anaerobio) para determinar la producción de lixiviados se puede replicar en diferentes lugares, con diferentes condiciones ambientales y con composiciones de MOP de los RSU.

Los resultados de los análisis físico-químicos de los lixiviados producto de los procesos aerobio y anaerobio demuestran que los primeros, que se dan en los botaderos a cielo abierto, a pesar de ser 4 veces menores en cantidad, tienen niveles contaminantes considerablemente superiores convirtiéndolos en una gran amenaza de los acuíferos cercanos.

RECOMENDACIONES

Investigar producción de lixiviados en laboratorio con el procedimiento implementado con diferentes componentes orgánicos y diferentes condiciones climáticas.

Investigar en lisímetros los niveles de retención de lixiviados utilizando diferentes composiciones de materia orgánica, con diferentes contenidos de bolsas plásticas.

Desarrollar celdas “tipo” sin bolsas plásticas ni elementos de retención para comparar resultados con los lisímetros y el método MGFRS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Espacial Civil Ecuatoriana. (2017). Obtenido de exa.ec
- Andrade , S., & Mondelli, G. (2-6 de Octubre de 2017). Gravimetric Composition of selective collection waste generated in the central area of Sao Paulo city. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italia: CISA.
- Bardales , J., De la Cruz , E., & Cabrera , C. (2015). Manejo integral de residuos sólidos domiciliarios por medio de la segregación en la fuente en el distrito de San Luis, Lima, Perú. *Revista del Instituto de Investigación RIIGEO*, 18(35), 23-29.
- Berger, K. (2015). On the current state of the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model. *Waste Management*, 201-209.
- Bernal , C. (2006). *Metodología para administración, economía, humanidades y ciencias sociales* . México : Pearson .
- Botanical. (2018). Obtenido de Botanical: <https://www.botanical-online.com/mijardinizquierda1.htm>
- Campbell, D. J. (1983). Understanding water balance in landfill sites. *Waste management* , 594-605.
- Cantahede, I. Á. (2005). Procedimiento Estadístico para los Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica.*, 15.
- Canziani, R., & Cossu, R. (1989). Landfill Hydrology and leachate production. *Sanitary Landfill: Process, technology and environmental impact*.
- Castro , B. (1993). Manual del programa de cómputo HELP.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria. (2005). *Procedimientos estadísticos para los estudios de caracterización de los residuos sólidos*. Lima : Organización Panamericana de la Salud.
- Chávez , N. (2001). *espacio, tiempo y materia: Un poco de química*. Buenos Aires: Siglo XXI Editores.
- Chofqui, A., Lhadi, E. K., Younsi, A., Mania, J., & Veron, A. (2004). Environmental impact of an urban landfill on a coastal aquifer (El Jadida, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 50-516.
- Christensen , T., Cossu, R., & Stegmann, R. (1992). Landfilling of waste: leachate . *Elsevier applied Science* , 520.
- Cointreau, S. (1982). *Environmental management of urban solid waste in developing countries*. Washington : Worl Bank.
- Collazos , H. (2008). *Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Collazos , H. (2011). *Diseño y operación de rellenos sanitarios*. Bogotá: Acodal.
- Consortio ILM Las Iguanas. (2012). *Caracterización de residuos sólidos urbanos*. Guayaquil.
- Consortio ILM Las Iguanas. (2016). *Caracterización de residuos sólidos urbanos*. 2016: Municipio de Guayaquil.
- Consulaudi. (2010). *Estudio 24 cantones de la provincia del Guayas*. Consejo Provincial del Guayas, Guayaquil.
- Díaz, L., & de Janon, C. (2010). *Reciclaje y Tratamiento Biológico de los residuos sólidos municipales*. Quito .
- El-Fadel, M., Findikakis, A., & Leckie, J. (18 de Diciembre de 1995). Environmental Impacts of Solid Waste Landfill. Stanford, California, USA.

- Fellner, J., & Brunner, P. (2010). Modeling of leachate generation from MSW landfills by a 2-dimensional 2-domain approach. *Waste Management*, 2084-2095.
- Gómez Chacón, I. (2010). *Educación matemática y ciudadanía*. Madrid: Biblioteca de Uno.
- González , V., Valle , S., Nirchio, M., Olivero , J., Tejada, L., Valdelamar, J., . . . González, K. (2018). Evaluación del riesgo de contaminación por metales pesados (Hg y Pb) en sedimentos marinos de Estero Huaylá, Puerto Bolívar, Ecuador . *Revista del Instituto de Investigación IIGEO*.
- Grugnaletti, M., Pantini, S., Verginelli, I., & Lombardi, F. (2016). An easy-to-use tool for the evaluation of leachate production at landfill sites. *Waste Management*, 204-219.
- Gutiérrez, R. (10 de Enero de 2015). Falta de conocimiento alimenticio. (O. Pérez, Entrevistador)
- Hafner, G., Rubach, M., Leverenz, D., Pils, P., & Kranert, M. (2-6 de Octubre de 2017). Large scale food waste monitoring in Germany. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italia .
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2015). Obtenido de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202011.pdf>
- Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos . (2010). Obtenido de INEC: www.ecuadorencifras.gob.ec
- Keenan, J. D. (1986). Landfill leachate management . *Journal of resource Management and technology*, 177-188.
- Kerlinger, F., & Lee, H. (2002). *Investigación del comportamiento: Métodos de investigación en ciencias sociales*. México: McGraw Hill.
- Khan , I., Wellard, M., Szilvia, A., Joardder, M., & Karim, M. (2016). Investigation of bound and free water in plant-based food material using NMR T relaxometry. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 252-261.
- Kiss, G., & Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 79, 39-51.
- LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., & Evans , J. C. (1996). *Gestión de Residuos Tóxicos, tratamiento, eliminación y recuperación de suelos*. Madrid: McGraw Hill.
- Lobo, A., & Tejero, I. (2007). MODUELO 2: A new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 59-72.
- Lobo, A., López, A., Cobo, N., & Tejero , I. (2008). Simulation of municipal solid waste reactors using Moduelo. *Waste and Resource Management*, 99-104.
- Marques, A. M., & Vilar , O. M. (2003). An analysis of the effects of compaction on the leachate generation in sanitary landfills. *Fifth Geoenvironmental Brazilian Congress* , 1-9.
- Melo , P., Ferreira, A., & Paixao , S. (5-9 de Octubre de 2015). Food waste in canteen trays of primary schools in the center of Portugal. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italia.
- Ministerio del Ambiente de Perú. (Abril de 2017). *LEY DE GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS N° 27314 D.L. 1278*. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Decreto-Legislativo->

- N%C2%B0-1278.pdf: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Decreto-Legislativo-N%C2%B0-1278.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (Mayo de 2015). *Ministerio Ambiente del Ecuador*. Obtenido de <http://suia.ambiente.gob.ec/documents/10179/185880/ACUERDO+061+REFORMA+LIBRO+VI+TULSMA+-+R.O.316+04+DE+MAYO+2015.pdf/3c02e9cb-0074-4fb0-afbe-0626370fa108>
- Mukherjee, S., Mukhopadhyay, S., Hashim, M., & Sen Gupta, B. (2015). Contemporary Environmental Issues of Landfill Leachate: Assessment and Remedies. *Critical Review in environmental science and technology*, 472-590.
- Muñoz, A. (2007). *Los métodos cuantitativo y cualitativo en la evaluación de impactos en proyectos de inversión social*. Guatemala: Universidad Mariano Gálvez de Guatemala.
- Naylor, J., Rowland, C., Young, C., & Barber, C. (1978). *The investigation of landfill sites*. U. K.: Water Research Centre.
- Organización Panamericana de la Salud. (2007). *Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales*. Obtenido de http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidad5.html
- Orta de Velasquez, M., Cruz-Rivera, R., Rojas-Valencia, N., Monje-Ramírez, I., & Sánchez-Gómez, J. (2003). Serial water balance method for predicting leachate generation in landfills. *Waste Management and Research*, 127-136.
- Orth, H. (1981). Aterros Sanitários. *Revista de Limpeza Pública*, 26-34.
- Pantini, S., Verginelli, I., & Lombardi, F. (10 de July de 2013). A new screening model for leachate production assessment. Roma.
- Pérez, E., Iraizoz, A., & Chávez, J. (2017). Manejo de residuos sólidos hospitalarios generados por los centros veterinarios de la ciudad de Machala, Ecuador. *Revista del Instituto de Investigaciones IIGEO*, 101-110.
- Pineda, M. S. (1998). *Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos*. Bogotá: Acodal.
- Popper, K. (2016). *La lógica de la investigación científica* (Segunda ed.). Madrid: España.
- Prades, M., Gallardo, A., & Ibáñez, M. (10 de Diciembre de 2014). Factors determining waste generation in Spanish towns and cities. España.
- Qasim, S. R., & Chiang, W. (1994). *Sanitary landfill leachate generation, Control and Treatment*. Pennsylvania: Technomic.
- Rapti-Caputo, D., & Vaccaro, C. (2006). Geochemical evidences of landfill leachate in groundwater. *Engineering Geology*, 85(1-2), 111-121.
- Röben, E. (2002). *Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales*. Loja: Deutscher Entwicklungsdienst Servicio Alemán de Cooperación Social - Técnica.
- Rosendal, R., & Hjelmar, O. (2-6 de Octubre de 2017). Sorting and separation of landfilled non-hazardous waste at five danish landfills. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italia.
- Sao Mateus, M., Machado, S., & Barbosa, M. (2012). An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill. *Waste Management*, 471-481.

- Saxton , K. E. (1983). Soil water hidrology: simulation for water balance computation proceedings. *Workshop on new approaches in water balance computations*, Hamburgo.
- Schlick, M. (1921). *Espacio y tiempo en la Física actual: Introducción para facilitar la inteligencia de la teoría de la relatividad y de la gravitación*. (G. García Morente , Trad.) Madrid: CALPE.
- Schroeder , P., & Tamsen , S. (1994). *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance HELP model*. Mississippi: U.S Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station.
- Slack, R., Gronow, J., & Voulvoulis, N. (2005). Household hazardous waste in municipal landfills: contaminants in leachate. *Science of The Total Environment*, 119-137.
- Srikiatden, J., & Roberts, J. (2007). Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, Models, and Measurements. *International Journal of Food Properties*, 739-777.
- Staley, B., & Barlaz, M. (2009). Composition of Municipal Solid Waste in the United States and Implications for Carbon Sequestration and Methane Yield. *Journal of Environmental Engineering*, 901-909.
- Standard Methods for the examination of water and wastewater. (2005). En A. P. Association, A. W. Association, & W. E. Federation, *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (págs. 2-56). Washington, DC: American Public Health Association. Obtenido de Standard Methods: <http://standardmethods.org>
- Stegmann, R., Heyer, K. U., & Cossu , R. (2005). Leachate Treatment Proceedings Sardinia 2005. *Tenth International Waste Management and landfill management*.
- Suárez, M. (2012). *Interaprendizaje de Probabilidades y Estadística Inferencial con Excel, Winstats y Graph*. Ibarra: Imprenta M & V.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1998). *Gestión Integral de residuos sólidos*. Madrid: McGraw Hill.
- Thorneloe, S., Garrabants, A. C., Kosson, D. S., & Helms, G. (04 de Octubre de 2013). The Next Generation of leaching test in the US and Europe. Cagliari, Italy.
- Tinoco, Ó., Crispín , S., & Rosales , P. (2009). *Estadística Básica*. Lima: Fondo Editorial UCH Universidad de Ciencias y Humanidades .
- Toma, J., & Rubio , J. (2015). *Estadísticas Aplicadas II Parte* . Lima: Universidad del Pacífico.
- Toma, J., & Rubio, J. (2014). *Estadística aplicada I Parte*. Lima: Universidad del Pacífico.
- United States Environmental Protection Agency. (2006). *Organic solid waste policy in the United States*. Obtenido de <https://www.epa.gov/>
- Universidad de Michigan. (2013). *Clasificación de los residuos sólidos municipales de Estados Unidos* .
- Valencia , R., van der Zon, W., Woelders , H., Lubberding , H., & Gjizen, H. (2009). Achieving “Final Storage Quality” of municipal solid waste in pilot scale bioreactor landfills. *Waste Management*, 78-85.
- van Breukelen, B., Roling , W., Groen, J., Griffioen, J., & van Verseveld, H. (2003). Biogeochemistry and isotope geochemistry of a landfill leachate plume. *Journal of Contaminant Hidrology*, 85(3-4), 245-268.

- van Turnhout , A., & Heimovaara, T. (02- 06 de Octubre de 2017). Coupled modeling of water flow, mass transport and biochemical activity to predict emission behavior of landfills. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italia.
- Visvantahan, C., Kurupan , P., Norbu, T., Trankler, J., Basnayake , B., Kurian , J., . . . Zhou Gonming. (2003). *Comparative study of municipal solid waste management in Asia*. Asian Institute of Technology ARPPET .
- von Buchwald , F. (1999). Experiences in the sanitary landfill of Guayaquil-Ecuador "Las Iguanas". *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Solid Waste Tecnology and Management* (pág. Section 1A). Philadelphia: Widener University School of Engineering.
- von Buchwald , F. (2003). DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS: LA EXPERIENCIA DE GUAYAQUIL. *CONGRESO BOLIVARIANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL*. Guayaquil.
- von Buchwald , F. (2011). EXPERIENCIAS EN EL RELLENO SANITARIO LAS IGUANAS. GUAYAQUIL - ECUADOR. *IV FERIA Y SEMINARIO INTERNACIONAL GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS*, (pág. 83). Medellín - Colombia.
- von Buchwald , F. (2017). Leachate retention under different organic fraction of municipal solid waste. Pilot scale. Guayaquil - Ecuador . *Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium*. Sardinia - Italy.
- von Buchwald , F., & Martínez , P. (2018). Producción de lixiviados, comparación del método de Tchobanoglous con experimentos en lisímetros. *Revista del Instituto de Investigación FIGMIM-UNMSM*, 63-76.
- von Buchwald, F. (2005). THE OPERATION EXPERIENCE IN THE SANITARY LANDFILL "LAS IGUANAS" GUAYAQUIL-ECUADOR. *Tenth International Waste Management and Landfill Symposium* (págs. 595-596). Sardinia - Italia: Environmental Sanitary Engineering Centre CISA.
- von Buchwald, F. (2009). *Impactos ambientales producidos por los lixiviados generados por los residuos sólidos del cantón Samborondon (Tesis de Maestría)*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- von Buchwald, F. (2017). Caracterización de la materia orgánica de los desechos domiciliarios urbanos de Guayaquil. *Congreso Interamericano de Residuos Sólidos*, (pág. 24). Cuenca.
- Wayback Machine. (17 de Diciembre de 2008). <https://web.archive.org/>. Obtenido de https://web.archive.org/web/20081217020417/http://www3.shastacollege.edu/dscollon/images/Maps-Images/world_climate_map.jpg: https://web.archive.org/web/20081217020417/http://www3.shastacollege.edu/dscollon/images/Maps-Images/world_climate_map.jpg
- Yan , R. Z., Tie , J. L., Xiang , S. C., Qiang , X., & Li , P. H. (2016). The effect of temperature on the biodegradation properties of municipal solid waste. *Waste Management & Research*, Vol. 34(3), 265-274.
- Zacharof , A. I., & Butler, A. P. (2004). Stochastic modelling of landfill processes incorporated waste heterogeneity and data uncertainty. *Waste Management*, 241-250.

ANEXOS

ANEXO 1: GLOSARIO

MARCO CONCEPTUAL O GLOSARIO

Balance hidrológico de los rellenos sanitarios: o método del balance del agua, es un método para calcular la producción de lixiviados, considerando la suma de todas las cantidades de agua que ingresan en un relleno sanitario y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua, siendo la producción II.

Celdas “tipo”: Es un depósito de residuos sólidos urbanos, que se asemeja a las celdas diarias de un relleno sanitario

Cuerpos hídricos: Los recursos hídricos son los cuerpos de agua que existen en el planeta, desde los océanos hasta los ríos pasando por los lagos, los arroyos y las lagunas. Estos recursos deben preservarse y utilizarse de forma racional ya que son indispensables para la existencia de la vida.

EC-RS: Empresas comercializadoras de residuos sólidos

EPS-RS: Empresas prestadoras de servicios de residuos sólidos

Geomembrana: Se define como un revestimiento o barrera de líquidos y vapores las cuales por lo general, son fabricadas a partir de combinaciones de polímeros termoestables o termoplásticos.

(<http://www.geomembranas.com.co/productos/geosinteticos/geomembranas/>) Impermeabilización: Cubrir una superficie con una sustancia o material impermeable para impedir que penetre en ella la humedad, el agua u otro líquido. [Ref. 8 Documentos electrónicos y páginas web consultadas]

Lixiviado: Líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión [Tchobanoglous, 1998 Ref. 13 Referencias Bibliográficas]

Material orgánico Putrescible: Son los residuos que provienen de la producción o utilización de materiales naturales sin transformación estructural significativa.

Por ello y por su grado de humedad mantienen un índice alto de biodegradabilidad: residuos forestales y de jardín, residuos animales, residuos de comida, heces animales, residuos agropecuarios y agroindustriales, entre otros. [Ref. 2 Documentos electrónicos y páginas web consultadas]

Patógenos: Un patógeno o agente biológico patógeno es aquel elemento o medio capaz de producir algún tipo de enfermedad o daño en el cuerpo de un animal, un ser humano o un vegetal. [Ref. 14 Documentos electrónicos y páginas web consultadas]

Metanogenización: Proceso de evolución de los gases de un relleno sanitario hasta que el metano sea el gas predominante.

Relleno sanitario: Técnica de tratamiento final de los residuos sólidos en el suelo, que no causa molestia ni peligro para la salud y seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de terminado el mismo, esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más pequeña posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. [Ref. 1 Documentos electrónicos y páginas web consultadas]

Residuos sólidos urbanos (RSU): Pueden definirse como los residuos generados en la comunidad urbana, provenientes de los procesos de consumo y desarrollo de las actividades humanas, y que normalmente son sólidos a temperatura ambiente. Además de los producidos por los usos residenciales, comerciales e institucionales, y por el aseo del espacio público, los RSU incluyen los residuos originados en las industrias y establecimientos de salud, siempre que no tengan características tóxicas ni peligrosas, en cuyo caso constituyen corrientes de residuos de otro tipo que deben ser manejadas según lo establecen las normativas específicas. [Ref. 3 Documentos electrónicos y páginas web consultadas]

Climas tropicales con invierno seco: Según Köpper, se define los climas tropicales con invierno seco, cuando tienen algún mes por debajo de 60 mm y si la precipitación del mes más seco es inferior a la fórmula $[100 - (\text{Precipitación anual}/25)]$. El periodo seco se da en invierno. Este tipo de clima se da en algunas regiones tropicales del continente americano, en la sabana de África subsahariana, oriental y meridional, en el subcontinente indio, en el sudeste asiático y en el norte de Australia. Ciudades donde se da: Bangalore, Bangkok, Barranquilla, Belo Horizonte, Bombay, Brasilia, Calcuta, Cali, Cancún, Caracas, Ciudad Ho Chi Minh, Cúcuta, Dacca, Darwin, Guayaquil, Kinsasa, Lagos, La Habana, La Romana, Manila, Mombasa, Maracay, Panamá, Port au Prince, Punta Cana, São Paulo, Saint John's, Santiago de Cuba, Valencia (Venezuela), Veracruz.

ANEXO 2: CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU

TEST DE NORMALIDAD

test	Normalidad	Datos
		Ceros
[1,] "CITRICOS"	"0.546647075039079" "SI NORMAL"	"60" "5"
[2,] "CHOCLO"	"0.461153343322949" "SI NORMAL"	"57" "8"
[3,] "COMIDA_PREPARADA"	"0.442125833835034" "SI NORMAL"	"63" "2"
[4,] "RESTOS_DE_JARDINER"	"0.00854882457565898" "NO"	"42" "23"
[5,] "CASC_PLAT_VERDE"	"0.500729741482204" "SI NORMAL"	"65" "0"
[6,] "GUABA"	"8.40549851943706e-13" "NO"	"14" "51"
[7,] "CANGREJO"	"4.32986979603811e-15" "NO"	"5" "60"
[8,] "CULANTRO"	"0.00290739611102842" "NO"	"37" "28"
[9,] "COCO"	"0.00107736942534364" "NO"	"35" "30"
[10,] "CONCHA"	"3.33066907387547e-16" "NO"	"4" "61"
[11,] "SANDÍA"	"1.62285245264293e-06" "NO"	"28" "37"
[12,] "MARACUYÁ"	"5.95745675013859e-13" "NO"	"12" "53"
[13,] "LECHUGA"	"4.22629709007083e-11" "NO"	"15" "50"
[14,] "PIÑA"	"9.88098491916389e-15" "NO"	"10" "55"
[15,] "MANGO"	"1.4432899320127e-15" "NO"	"5" "60"
[16,] "YUCA"	"1.82714085505964e-06" "NO"	"28" "37"
[17,] "ZAPALLO"	"7.77776731908375e-11" "NO"	"15" "50"
[18,] "OTROS"	"0.724157876937343" "SI NORMAL"	"65" "0"

test	Normalidad	Datos
		Ceros
[1,] "PLASTICOS.."	"0.504412620316356" "SI NORMAL"	"65" "0"
[2,] "PAPEL.Y.CARTON.."	"0.115405242352278" "SI NORMAL"	"65" "0"
[3,] "VIDRIO.."	"0.332469238555479" "SI NORMAL"	"64" "1"
[4,] "METAL.."	"0.0355002106538446" "NO"	"65" "0"
[5,] "CAUCHO.."	"0.00251926850067186" "NO"	"37" "28"
[6,] "MADERA.RESIDPLANT"	"0.0986097009506992" "SI NORMAL"	"63" "2"
[7,] "TIERR.PIED.MAT.CON"	"0.0131550221829722" "NO"	"41" "24"
[8,] "OTROS.cuero..etc."	"0.893330105532199" "SI NORMAL"	"65" "0"

MATERIA ORGÁNICA	PROMEDIO PONDERADO DE COMPOSICIÓN DE MATERIA ORÁNICA DE LOS RSU DE GUAYASQUIL - TODOS LOS ESTRATOS SOCIO-ECONÓMICOS (%)						ANÁLISIS ESTADÍSTICO
	BAJO	MEDIO BAJO	MEDIO	MEDIO ALTO	ALTO	PROMEDIO PONDERADO	NORMALIDAD
	%	%	%	%	%	%	
CITRICOS	1.30	1.62	1.75	1.68	0.96	7.32	SI
CHOCLO	0.64	1.08	1.60	1.01	0.56	4.89	SI
COMIDA_PREPARADA	2.48	3.27	2.71	1.32	2.32	12.09	SI
RESTOS_DE_JARDINERIA	1.15	1.32	0.82	0.18	0.90	4.37	
CASCARA_DE_PLATANO_VERDE	2.61	3.21	3.88	2.50	2.20	14.40	SI
GUABA	0.13	0.17	0.01	0.07	0.10	0.48	
CANGREJO	0.10	0.03	0.15	-	-	0.28	
CULANTRO	0.12	0.44	0.51	0.15	0.07	1.28	
COCO	0.21	0.37	1.04	0.57	0.69	2.86	
CONCHA	0.03	0.13	0.10	-	-	0.26	
SANDÍA	0.31	0.11	0.25	0.27	0.13	1.07	
MARACUYÁ	0.08	0.08	0.07	0.14	0.06	0.43	
LECHUGA	0.04	0.00	0.14	0.37	0.11	0.68	
PIÑA	0.06	0.10	-	0.19	0.10	0.44	
MANGO	0.03	0.15	-	-	0.07	0.25	
YUCA	0.20	0.48	0.33	0.19	0.04	1.23	
ZAPALLO	0.17	0.12	0.32	0.06	0.00	0.67	
OTROS (NO SE PUEDE SEPARAR)	1.34	1.12	1.30	0.81	0.84	5.41	SI
TOTAL PARCIAL (ORGÁNICOS)	11.00	13.78	14.99	9.50	9.15	58.42	44.11
% PAPEL / CARTÓN	1.49	2.06	1.93	1.47	1.78	8.73	SI
% PLÁSTICOS	2.93	3.22	3.52	2.09	2.54	14.29	SI
% VIDRIO	0.45	0.54	0.98	0.74	0.36	3.07	SI
% METAL	0.28	0.27	0.46	0.37	0.30	1.67	
% CAUCHO	0.15	0.19	0.44	0.25	0.15	1.18	
% MADERA Y RESIDUOS DE PLANTAS	0.45	0.68	1.00	0.55	0.55	3.24	SI
% PIEDRA	0.25	0.54	0.68	0.30	0.16	1.92	
% OTROS (PAÑALES, TELA, CUERO, ETC)	1.45	1.87	2.16	0.86	1.14	7.48	SI
TOTAL PARCIAL (INORGÁNICOS)						41.58	36.80
TOTAL						100.00	80.91

Los elementos 10 elementos que tienen características de normalidad representan el 80.91% del peso total de los RSU.

El resto de la información contenida en este anexo puede encontrarla en el siguiente link: <https://1drv.ms/f/s!Asasolvqt8ergpsHc-F-981MvT3KA>

ANEXO 3: MGFRS NORMALIZADO

MGFRS ANAEROBIO DIARIO NORMALIZADO

	1	2	3	5	18	44,11%	58,42%
DÍA	CITRICO NARANJA	CHOCLO	COMIDA PREPARAD	VERDE	OTROS	PROMEDIO PONDERAD	PROMEDIO PONDERAD
ANAEROBIO	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t		LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t
	PROMEDIO DIARIO	PROMEDIO DIARIO	PROMEDIO DIARIO	PROMEDIO DIARIO		PROMEDIO DIARIO	PROMEDIO DIARIO
DÍA	CITRICO NARANJA	CHOCLO	COMIDA PREPARAD	VERDE	OTROS	PROMEDIO PONDERAD	PROMEDIO PONDERAD
0	-	-	-	-	-	-	-
1	2,05	-	26,10	-	3,58	3,56	4,72
2	3,56	0,09	33,54	0,12	4,98	4,69	6,21
3	5,51	6,06	47,09	8,37	6,28	8,02	10,63
4	6,66	9,56	52,40	10,84	20,15	10,04	13,30
5	8,69	13,92	65,43	18,16	28,27	13,48	17,85
6	14,10	17,99	79,82	22,99	32,50	16,76	22,20
7	18,91	22,63	93,56	33,48	55,91	21,79	28,86
8	23,09	30,30	73,10	39,38	81,04	22,15	29,34
9	28,67	41,67	58,62	49,30	116,79	24,68	32,69
10	34,35	48,77	46,60	60,97	111,48	25,31	33,53
11	39,76	62,21	38,04	82,43	98,27	27,60	36,56
12	65,94	66,86	31,20	95,87	88,08	30,25	40,07
13	86,19	71,97	25,48	98,35	69,23	30,62	40,56
14	133,76	63,17	20,27	91,40	59,26	31,57	41,82
15	122,89	57,48	9,88	66,16	45,93	24,94	33,03
16	84,05	43,28	6,42	55,55	32,82	18,73	24,81
17	57,74	38,92	4,17	42,81	24,92	14,06	18,63
18	38,46	31,25	2,65	27,83	16,90	9,53	12,62
19	21,67	24,15	1,52	21,81	6,72	6,40	8,47
20	15,46	18,18	1,22	18,75	3,90	5,03	6,66
21	12,44	12,69	0,71	10,26	2,60	3,21	4,25
22	7,45	9,19	2,35	7,54	1,95	2,45	3,25
23	4,52	4,93	1,22	3,30	1,19	1,25	1,66
24	2,92	2,94	0,51	2,71	0,76	0,84	1,12
25	1,76	0,95	0,30	0,94	0,65	0,38	0,51
26	0,88	0,38	-	0,59	0,22	0,18	0,24
27	0,26	-	-	0,12	-	0,04	0,05
28	0,17	-	-	-	-	0,01	0,02
29	-	-	-	-	-	-	-

MGFRS ANAEROBIO ACUMULADO DIARIO NORMALIZADO

	1	2	3	5	18	
DÍA	CITRICO NARANJA	CHOCLO	COMIDA PREPARADA	VERDE	OTROS	PROMEDIO PONDERAD
ANAEROBIO	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t
	PROMEDIO ACUMULADO	PROMEDIO ACUMULADO	PROMEDIO ACUMULADO	PROMEDIO ACUMULADO	PROMEDIO ACUMULADO	PROMEDIO ACUMULAD
DÍA	CITRICO NARANJA	CHOCLO	COMIDA PREPARADA	VERDE	OTROS	PROMEDIO PONDERAD
0	-	-	-	-	-	-
1	2,05	-	26,1	-	3,58	4,72
2	5,61	0,09	59,64	0,12	8,56	10,93
3	11,12	6,15	106,74	8,49	14,84	21,56
4	17,79	15,72	159,14	19,34	34,99	34,86
5	26,48	29,64	224,57	37,5	63,27	52,71
6	40,58	47,63	304,39	60,49	95,77	74,91
7	59,49	70,26	397,94	93,98	151,67	103,77
8	82,57	100,56	471,04	133,36	232,71	133,11
9	111,25	142,23	529,66	182,66	349,51	165,8
10	145,6	191	576,26	243,62	460,99	199,32
11	185,36	253,2	614,31	326,06	559,26	235,88
12	251,3	320,06	645,5	421,93	647,34	275,95
13	337,49	392,03	670,98	520,28	716,58	316,51
14	471,25	455,2	691,25	611,68	775,84	358,33
15	594,14	512,68	701,13	677,84	821,77	391,36
16	678,19	555,96	707,55	733,39	854,59	416,17
17	735,93	594,88	711,72	776,2	879,52	434,8
18	774,39	626,13	714,37	804,02	896,42	447,42
19	796,05	650,27	715,9	825,83	903,14	455,9
20	811,51	668,45	717,12	844,59	907,04	462,55
21	823,96	681,15	717,83	854,84	909,64	466,8
22	831,4	690,33	720,18	862,38	911,59	470,05
23	835,92	695,26	721,4	865,68	912,78	471,71
24	838,84	698,2	721,9	868,39	913,54	472,83
25	840,6	699,14	722,2	869,34	914,19	473,34
26	841,48	699,52	722,2	869,93	914,4	473,57
27	841,74	699,52	722,2	870,05	914,4	473,62
28	841,92	699,52	722,2	870,05	914,4	473,64
29	841,92	699,52	722,2	870,05	914,4	473,64
30	841,92	699,52	722,2	870,05	914,4	473,64

El resto de la información contenida en este anexo, la puede visualizar en el siguiente link: <https://1drv.ms/u/s!Asasolvqt8ergp0m3wL3XgVTiqvV8Q?e=9mM3Ww>

ANEXO 4: TEST DE NORMALIDAD EN COMPONENTES DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU

ANEXO 4 CARACTERIZACIONES GENERALES 2012 - 2016 – 2017 DE LOS RSU DE GUAYAQUIL

Para poder modelar fenómenos naturales, sociales y psicológicos, éstos deben tener una distribución normal, también llamada distribución de Gauss o distribución Gaussiana; en nuestro caso se busca hacer una modelación con los datos de la caracterización de los RSU de la ciudad de Guayaquil, haciendo estudios estadísticos (descriptivos) de cada uno de los elementos que la conforman.

Se tienen registros de caracterizaciones realizadas en el relleno sanitario de Guayaquil en los años 2012, 2016 y 2017, con clasificación general de 9 elementos, sumando 192 muestras. Para esta investigación se analizaron además los elementos que conforman los materiales orgánicos desglosándolos en 18 elementos.

Para determinar la normalidad de los elementos, se pueden hacer pruebas de Anderson -Darling, Ryan – Joiner, Shapiro – Wilk o Kolmogorov – Smirnov. Consideramos apropiada la prueba Kolmogorov- Smirnov por ser la más robusta en el análisis con datos dispersos (es la prueba que utiliza el mayor error posible) y para correr las pruebas, utilizamos el programa estadístico "R".

El test de normalidad de los elementos que constituyen la clasificación generalmente utilizada (con 9 elementos) arroja los siguientes resultados:

TEST DE NORMALIDAD

	test	Normalidad	Datos	Ceros
[1,]	"ORGANICOS.."	"SI NORMAL"	"192"	"0"
[2,]	"PLASTICOS.."	"SI NORMAL"	"192"	"0"
[3,]	"PAPEL.Y.CARTON.."	"SI NORMAL"	"192"	"0"
[4,]	"VIDRIO.."	"NO"	"191"	"1"
[5,]	"METAL.."	"NO"	"189"	"3"
[6,]	"CAUCHO.."	"NO"	"84"	"108"
[7,]	"MADERA.Y.RESIDUOS.DE.PLANTAS.."	"NO"	"189"	"3"
[8,]	"TIERRA..PIEDRAS..MAT.DE.CONST..."	"NO"	"159"	"33"
[9,]	"OTROS..pañales..tela..cuero..etc..."	"SI NORMAL"	"192"	"0"

Los elementos cuyas muestras aleatorias presentan una normalidad son : ORGÁNICOS (59%), PLÁSTICOS (14%), PAPEL Y CARTON (10%9 Y OTROS (7%), lo que suma más del 90% del peso. Por tal razón se pueden modelar los resultados futuros, aunque con una gran variabilidad.

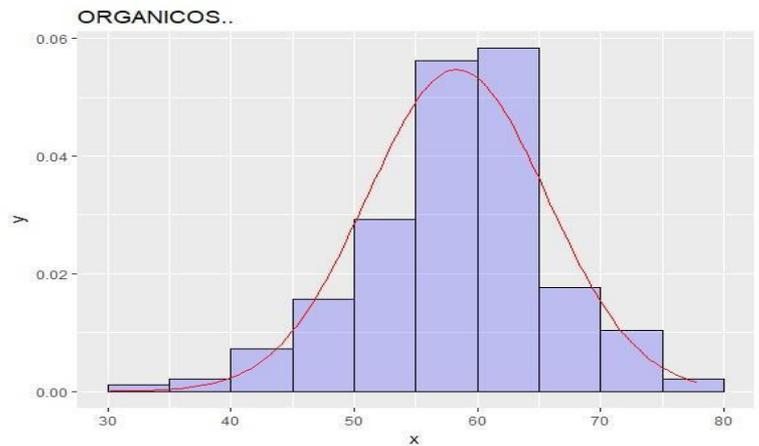
§ORGANICOS. .

\$ORGANICOS..[[1]]

	x	f(x)		x	f(x)
[1,]	"[30-35)"	"0.0052"	[6,]	"[55-60)"	"0.2812"
[2,]	"[35-40)"	"0.0104"	[7,]	"[60-65)"	"0.2917"
[3,]	"[40-45)"	"0.0365"	[8,]	"[65-70)"	"0.0885"
[4,]	"[45-50)"	"0.0781"	[9,]	"[70-75)"	"0.0521"
[5,]	"[50-55)"	"0.1458"	[10,]	"[75-80)"	"0.0104"

\$ORGANICOS..[[2]]

[1] "La media es 58.339 y su desviación estándar es 7.294"



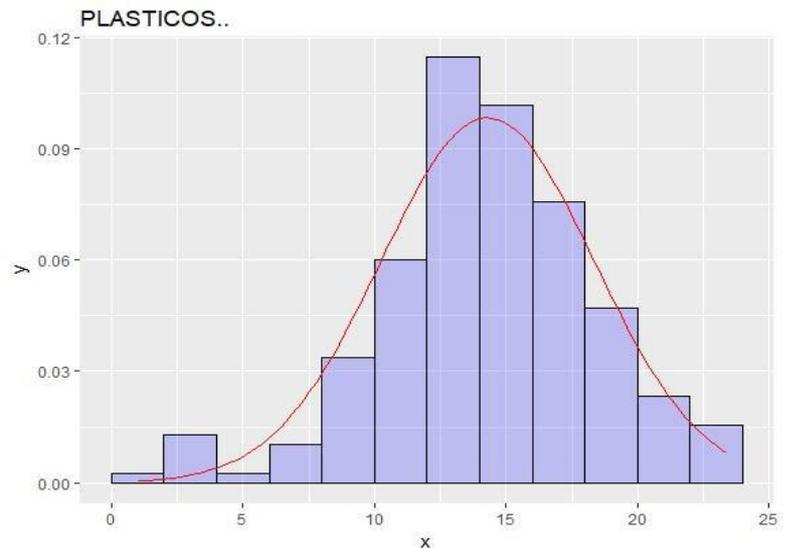
\$PLASTICOS..

\$PLASTICOS..[[1]]

x	f(x)	x	f(x)	x	f(x)			
[1,]	"[0-2)"	"0.0052"	[5,]	"[8-10)"	"0.0677"	[9,]	"[16-18)"	"0.151"
[2,]	"[2-4)"	"0.026"	[6,]	"[10-12)"	"0.1198"	[10,]	"[18-20)"	"0.0938"
[3,]	"[4-6)"	"0.0052"	[7,]	"[12-14)"	"0.2292"	[11,]	"[20-22)"	"0.0469"
[4,]	"[6-8)"	"0.0208"	[8,]	"[14-16)"	"0.2031"	[12,]	"[22-24)"	"0.0312"

\$PLASTICOS..[[2]]

[1] "La media es 14.304 y su desviación estándar es 4.059"

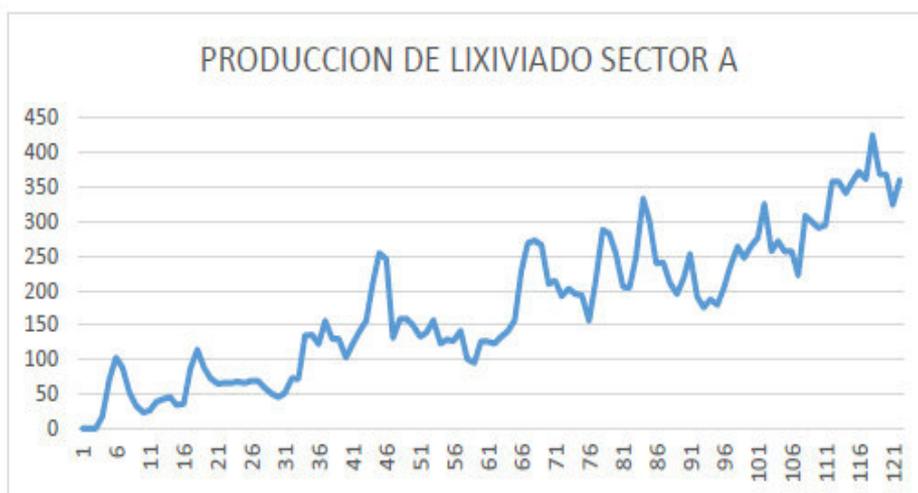


El resto de la información contenida en este anexo, puede visualizarla en el siguiente link: https://1drv.ms/f/s!Asasolvqt8ergptD_0hhYIPCzJ0B2g

ANEXO 5: REGISTRO DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS EN RELLENO SANITARIO LAS IGUANAS – GUAYAQUIL, ECUADOR

RS LAS IGUANAS		SECTOR A		24,91
FECHA	Lixiviado	RSU	Lixiviado	
	promedio/ día	Promedio /día	Promedio /día	
	metro cúbico/día	Toneladas /día	Kg/ton	
1	sep-94	0	1.581,98	-
2	oct-94	0	1.135,36	-
3	nov-94	0,5	1.262,96	0,4
4	dic-94	17,59	1.404,91	12,52
5	ene-95	71,82	1.448,59	49,58
6	feb-95	102,35	1.463,73	69,92
7	mar-95	88	1.452,87	60,57
8	abr-95	51	1.362,74	37,42
9	may-95	33,51	1.419,92	23,6
10	jun-95	23,6	1.453,69	16,23
11	jul-95	25,85	1.460,80	17,7
12	ago-95	38,37	1.452,85	26,41
13	sep-95	43,05	1.429,41	30,12
14	oct-95	45,15	1.318,26	34,25
15	nov-95	33,7	1.335,12	25,24
16	dic-95	35,9	1.397,21	25,69
17	ene-96	86,23	1.395,69	61,78
18	feb-96	114,1	1.505,10	75,81
19	mar-96	88,52	1.595,52	55,48
20	abr-96	72,5	1.503,26	48,23
21	may-96	64,94	1.478,69	43,92
22	jun-96	66,41	1.441,70	46,06
23	jul-96	65,77	1.481,53	44,39
24	ago-96	67,73	1.549,44	43,71
25	sep-96	65,9	1.490,27	44,22
26	oct-96	69,19	1.558,38	44,4
27	nov-96	68,5	1.577,90	43,41
28	dic-96	59,42	1.583,03	37,54
29	ene-97	50,9	1.464,07	34,77
30	feb-97	45,68	1.421,54	32,13
31	mar-97	51,68	1.660,87	31,12
32	abr-97	72,4	1.764,60	41,03
33	may-97	71,42	1.740,88	41,03
34	jun-97	134,82	1.718,76	78,44
35	jul-97	135,57	1.740,20	77,9
36	ago-97	122,4	1.622,26	75,45
37	sep-97	156,1	1.607,93	97,08
38	oct-97	129,62	1.693,32	76,55
39	nov-97	129,62	1.697,92	76,34
40	dic-97	102,31	1.778,10	57,54
41	ene-98	122,42	1.775,85	68,94
42	feb-98	139,99	1.695,39	82,57
43	mar-98	155,54	1.805,68	86,14
44	abr-98	210,1	1.825,02	115,12
45	may-98	254,1	1.892,33	134,28
46	jun-98	244,92	1.872,09	130,83
47	jul-98	130,82	1.828,88	71,53
48	ago-98	159,31	1.773,61	89,82
49	sep-98	159,384	1.838,36	86,7
50	oct-98	149,2	1.603,16	93,07
51	nov-98	133,1	1.609,09	82,72
52	dic-98	139,91	1.683,15	83,12
53	ene-99	156,8	1.681,03	93,28
54	feb-99	123,26	1.709,81	72,09
55	mar-99	129,07	1.535,14	84,08
56	abr-99	127,25	1.726,08	73,72
57	may-99	141,4	1.690,80	83,63
58	jun-99	101,26	1.662,95	60,89
59	jul-99	95,203	1.692,44	56,25
60	ago-99	126,16	1.690,28	74,64
61	sep-99	125,98	1.709,76	73,68
62	oct-99	123,55	1.601,02	77,17
63	nov-99	133,14	1.695,00	78,55
64	dic-99	140,35	1.838,96	76,32
65	ene-00	157,43	1.627,53	96,73
66	feb-00	227,69	1.722,99	132,15
67	mar-00	268,56	1.686,04	159,28
68	abr-00	272,48	1.775,61	153,46
69	may-00	265,61	1.707,38	155,57
70	jun-00	209,29	1.706,44	122,65
71	jul-00	213,81	1.632,36	130,98
72	ago-00	191,36	1.733,05	110,42
73	sep-00	202,5	1.689,64	119,85
74	oct-00	194,36	1.627,66	119,41
75	nov-00	192,76	1.677,85	114,89
76	dic-00	156,21	1.687,87	92,55
77	ene-01	213,51	1.684,80	126,73

78	feb-01	287,63	1.703,67	168,83	101	ene-03	276,47	1.953,58	141,52
79	mar-01	281,96	1.806,19	156,11	102	feb-03	325,26	1.923,81	169,07
80	abr-01	253,86	1.665,41	152,43	103	mar-03	256,52	1.863,12	137,68
81	may-01	205,84	1.708,85	120,46	104	abr-03	271,36	1.910,49	142,04
82	jun-01	203,39	1.707,58	119,11	105	may-03	256,75	1.898,93	135,21
83	jul-01	247,99	1.750,13	141,7	106	jun-03	256,71	1.872,86	137,07
84	ago-01	333,63	1.780,00	187,43	107	jul-03	221,76	1.865,23	118,89
85	sep-01	299,03	1.705,59	175,32	108	ago-03	308,26	1.813,91	169,94
86	oct-01	239,64	1.745,91	137,26	109	sep-03	299,03	1.790,48	167,01
87	nov-01	240,18	1.706,04	140,78	110	oct-03	290,83	1.895,75	153,41
88	dic-01	211,14	1.892,75	111,55	111	nov-03	294,2	530,38	554,7
89	ene-02	194,99	1.720,48	113,33	112	dic-03	357,71	419,47	852,76
90	feb-02	217,36	1.870,46	116,21	113	ene-04	357,29	1.769,41	201,93
91	mar-02	252,42	1.847,02	136,66	114	feb-04	341,06	843,08	404,54
92	abr-02	191,09	1.924,57	99,29	115	mar-04	357,45	1.708,49	209,22
93	may-02	175,52	1.861,43	94,29	116	abr-04	371,98	335,16	1.109,85
94	jun-02	187,4	1.818,93	103,03	117	may-04	361,02	1.919,31	188,1
95	jul-02	179,64	1.784,03	100,69	118	jun-04	425,48	2.142,42	198,6
96	ago-02	203,21	1.750,41	116,09	119	jul-04	368,01	2.236,34	164,56
97	sep-02	235,65	1.731,89	136,07	120	ago-04	368,01	2.181,49	168,7
98	oct-02	263,6	1.823,05	144,59	121	sep-04	323,8	2.201,70	147,07
99	nov-02	246,69	1.815,47	135,88	122	oct-04	360,47	565,91	636,98
100	dic-02	264,21	2.018,33	130,91				promedio/ día	24,91



El resto de la información contenida en este anexo se puede visualizar en el link:

<https://1drv.ms/u/s!Asasolvqt8ergptGYjMJi80uh8LZdw?e=0nzSH9>

ANEXO 6: MODELACIÓN

Modelación de celda norte

```
> #Ajuste del primer modelo
> mod1<-lm(y ~ log(x))
> rmod1<-summary(mod1) #Resumen del modelo
> rmod1
```

```
Call: lm(formula = y
~ log(x))
```

Residuals:

```
      Min       1Q   Median       3Q      Max   -
3.0993 -0.8602  0.3365  0.6520 11.3213
```

Coefficients:

```
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -11.3213     0.6863  -16.50  <2e-16 ***
log(x)       9.7008     0.1811   53.57  <2e-16 ***
---
```

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.709 on 102 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9657, Adjusted R-squared: 0.9653

F-statistic: 2870 on 1 and 102 DF, p-value: < 2.2e-16

```
> anova(mod1) #Tabla anova
Analysis of Variance Table
```

Response: y

```
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
log(x)         1 8380.6  8380.6  2870.2 < 2.2e-16
*** Residuals 102  297.8     2.9
---
```

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```
>
```

```
> plot(x,y) #Gráfico del modelo 1
```

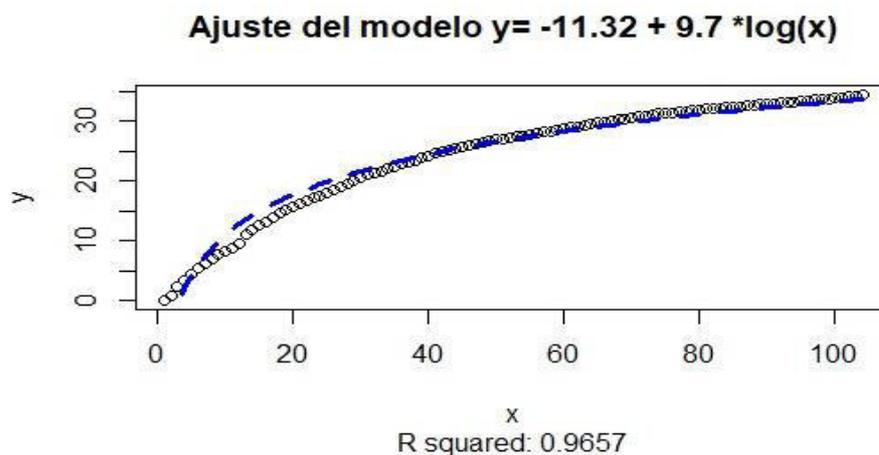
```
> lines(x,predict(mod1),lty=2,col="blue",lwd=3)
```

```
> title(main=paste("Ajuste del modelo
y=",round(mod1$coefficients[1],2 ),
```

```
+           "+",round(mod1$coefficients[2],2),"*log(x)"),
```

```
+           sub=paste("R squared:",round(rmod1$r.squared,4)))
```

```
>
```



```
> #Ajuste del segundo modelo
> mod2<-lm(y~ I(1/x))
> rmod2<-summary(mod2) #Resumen del modelo
> rmod2
```

```
Call
lm(
  formula = y ~ I(1/x))
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max	-
	13.525	-5.132	1.630	5.655	24.101	

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(>|t|)
(Intercept)	26.8975	0.7574	35.512	< 2e-16 ***
I(1/x)	-50.9986	6.0401	-8.443	2.21e-13 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.077 on 102 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4114, Adjusted R-squared: 0.4056

F-statistic: 71.29 on 1 and 102 DF, p-value: 2.212e-13

```
> anova(mod2) #Tabla anova
Analysis of Variance Table
```

Response: y

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
--	----	--------	---------	---------	--------

```

I(1/x)      1 3570.2  3570.2   71.29 2.212e-13 ***
Residuals 102 5108.2    50.1
---

```

```

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

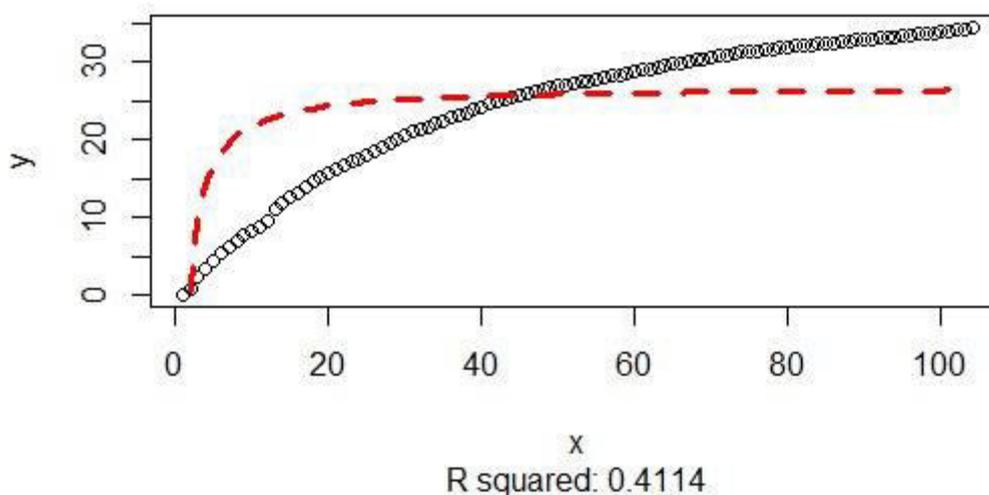
```

```

>
> plot(x,y) #Gráfico del modelo 2
> lines(x,predict(mod2),lty=2,col="red",lwd=3)
> title(main=paste("Ajuste del modelo
y=",round(mod1$coefficients[1],2 ),
+           "+",round(mod1$coefficients[2],2),"*(1/x)",
+           sub=paste("R
squared:",round(rmod2$r.squared,4))) >

```

Ajuste del modelo $y = -11.32 + 9.7 \cdot (1/x)$



Una vez analizadas estas alternativas de ecuaciones, se escoge como más conveniente la que tiene Anova (Análisis de varianza) con valores de $p=2.2e-16$ y cuya ecuación tiene un valor de $R^2 = 0.9657$ siendo la ecuación $y = -11,32+9,70 \cdot \log(x)$. En el programa "R" la expresión "log(x)" se refiere al logaritmo neperiano "ln(x)".

El resto de la información contenida en el anexo se puede visualizar en el siguiente link:

<https://1drv.ms/u/s!Asasolvqt8ergp0o5foUXQXJt6CYyA?e=Fx3L5B>

ANEXO 7: MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Métodos estadísticos Bondades de los métodos estadísticos

Los métodos estadísticos se consideran para hacer inferencias sobre los datos colectados durante una prueba científica o de laboratorio, este tipo de pruebas sobre los datos pueden evidenciar tendencias ocultas dentro del conjunto de variables investigadas.

Las inferencias de tipo estadística pueden probar diferencias significativas entre muestras, diferencias significativas de variabilidad y hasta diferencias significativas entre correlaciones de variables (probar si dos conjuntos de variables siguen una misma tendencia o se diferencian).

Descripción de los métodos Interpolación (Matemático determinístico)

En ciertos casos el usuario conoce el valor de una función $f(x)$ en una serie de puntos x_1, x_2, \dots, x_N , pero no se conoce una expresión analítica de $f(x)$ que permita calcular el valor de la función para un punto arbitrario. Un ejemplo claro son las mediciones de laboratorio, donde se mide cada minuto un valor, pero se requiere el valor en otro punto que no ha sido medido. Otro ejemplo son mediciones de temperatura en la superficie de la Tierra, que se realizan en equipos o estaciones meteorológicas y se necesita calcular la temperatura en un punto cercano, pero distinto al punto de medida. La idea de la interpolación es poder estimar $f(x)$ para un x arbitrario, a partir de la construcción de una curva o superficie que une los puntos donde se han realizado las mediciones y cuyo valor si se conoce. Se asume que el punto arbitrario x se encuentra **dentro de los límites de los puntos de medición**, en caso contrario se llamaría extrapolación. En este texto se discute exclusivamente la interpolación, aunque la idea es similar.

PRECAUCION: El uso indiscriminado de extrapolación no es recomendable, siempre tratar con cuidado. Existe un sinnúmero de métodos de interpolación, incluyendo la interpolación lineal, polinomial, y el spin.

Spline tipo polinomio (ppform)

Un spline tipo polinomio de orden k provee una descripción de la naturaleza de un evento mediante sumas sucesivas de términos llamados $p(x)$, donde los coeficientes a obtenidos denominados por c determinan una función polinómica para cada intervalo (break) dado por E_i .

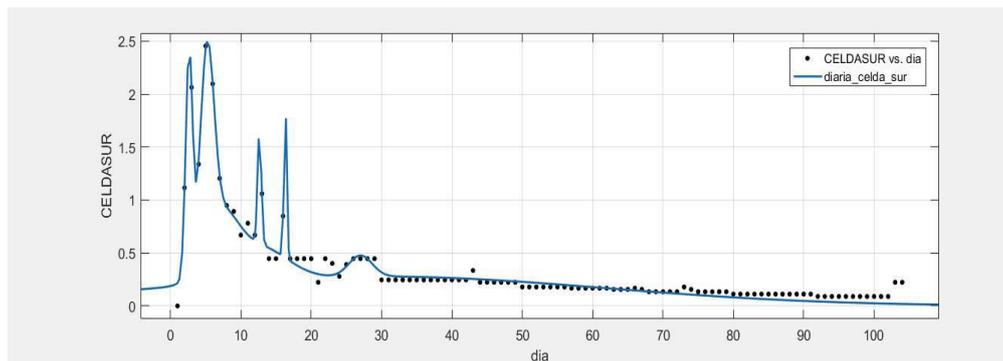
$$p_j(x) = \sum_{i=1}^k (x - \xi_j)^{k-i} c_{ji}, \quad j = 1 : l$$

Spline tipo Gauss

Un spline tipo Gauss de orden k provee una descripción de la naturaleza de un evento mediante sumas sucesivas de términos llamados $p(x)$, donde los coeficientes a obtener denominados por a,b,c determinan una suma de funciones.

$$p(x) = \sum a_i \cdot e^{-\frac{(x-b_i)^2}{c_i}}$$

Usos de los métodos y comportamiento matemático de los datos Celda sur



Modelo Gauss8:

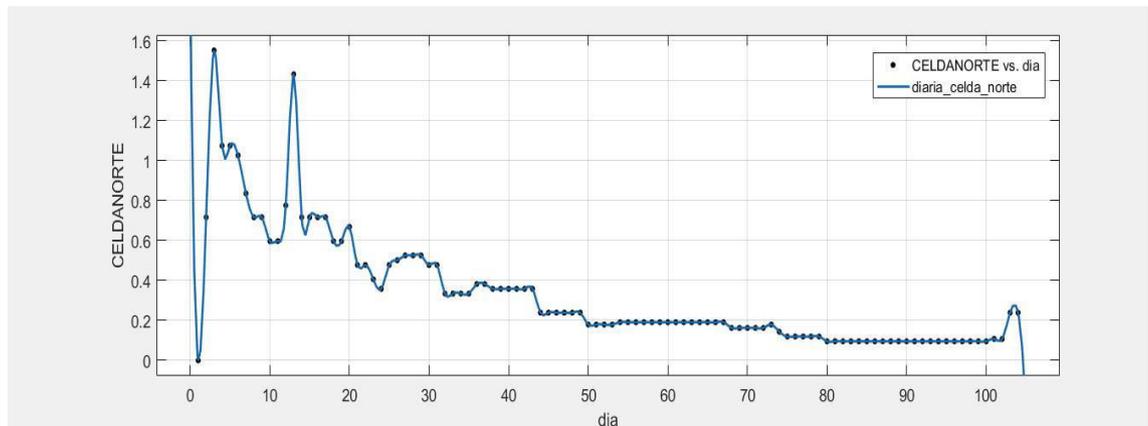
$f(x) =$

$$a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2) + a6 \cdot \exp(-((x-b6)/c6)^2) + a7 \cdot \exp(-((x-b7)/c7)^2) + a8 \cdot \exp(-((x-b8)/c8)^2)$$

Coeficiente

a1 =	113.1	c3 =	2.363	b6 =	16.2
b1 =	3.383	a4 =	0.903	c6 =	2.334
c1 =	0.3135	b4 =	21.24	a7 =	0.3381
a2 =	2.879	c4 =	1.461	b7 =	63.36
b2 =	5.14	a5 =	2.481	c7 =	1.233e+06
c2 =	1.483	b5 =	8.667	a8 =	0.1401
a3 =	40.06	c5 =	2.417	b8 =	48.81
b3 =	16.2	a6 =	-39.57	c8 =	9.763

Celda norte



Modelo Gauss8:

$$f(x) =$$

$$a1 \cdot \exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4 \cdot \exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5 \cdot \exp(-((x-b5)/c5)^2) + a6 \cdot \exp(-((x-b6)/c6)^2) + a7 \cdot \exp(-((x-b7)/c7)^2) + a8 \cdot \exp(-((x-b8)/c8)^2)$$

a1 =	0.8378	c3 =	3.312	b6 =	50.19
b1 =	2.754	a4 =	-8.438	c6 =	9.064
c1 =	0.7175	b4 =	-15.35	a7 =	0.06589
a2 =	0.8284	c4 =	11.59	b7 =	41.4
b2 =	12.86	a5 =	1.803e+13	c7 =	2.566
c2 =	0.6667	b5 =	-2745	a8 =	0.148
a3 =	0.7991	c5 =	495.2	b8 =	16.26
b3 =	4.035	a6 =	-0.06837	c8 =	2.944

El resto de la información contenida en el anexo se puede visualizar en el siguiente link:

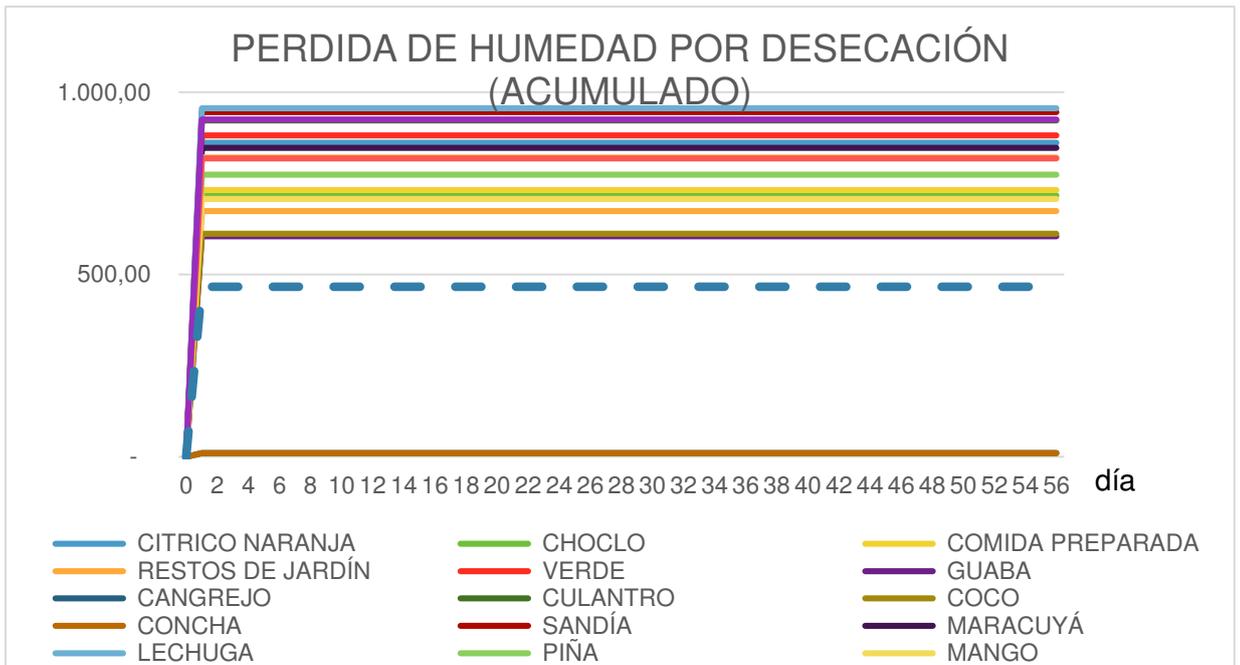
<https://1drv.ms/u/s!Asasolvqt8ergp0saGObja19P0ITAg?e=iqaWbz>

ANEXO 8: MÉTODO GRAVIMÉTRICO POR FILTRACION EN RELLENO SANITARIOS

Ensayos de laboratorio MGFRS y desecación

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DÍA	CITRICO NARANJA	CHOCLO	COMIDA PREPARADA	RESTOS DE JARDÍN	VERDE	GUABA	CANGREJO	CULANTRO	COCO
DESECACION	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t			LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t	LIXIVIADO Kg/t
	PROM. ACUM.	PROM. ACUM.			PROM. ACUM.	PROM. ACUM.	PROM. ACUM.	PROM. ACUM.			PROM. ACUM.
DÍA	CITRICO NARANJA	CHOCLO	COMIDA PREPARAD.	RESTOS DE JARDÍN	VERDE	GUABA	CANGREJO	CULANTRO	COCO
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
2	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
3	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
4	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
5	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
6	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
7	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
8	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
9	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
10	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
11	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
12	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
13	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
14	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
15	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
16	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
17	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
18	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
19	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
20	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
21	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
22	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
23	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
24	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
25	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
26	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
27	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
28	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
29	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
30	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
31	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
32	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
33	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
34	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
35	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
36	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
37	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
38	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
39	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
40	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
41	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
42	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
43	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
44	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
45	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
46	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
47	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08

48	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
49	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
50	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
51	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
52	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
53	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
54	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
55	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08
56	860,96	716,69	731,51	673,98	881,80	604,65	10,04	922,76	612,08

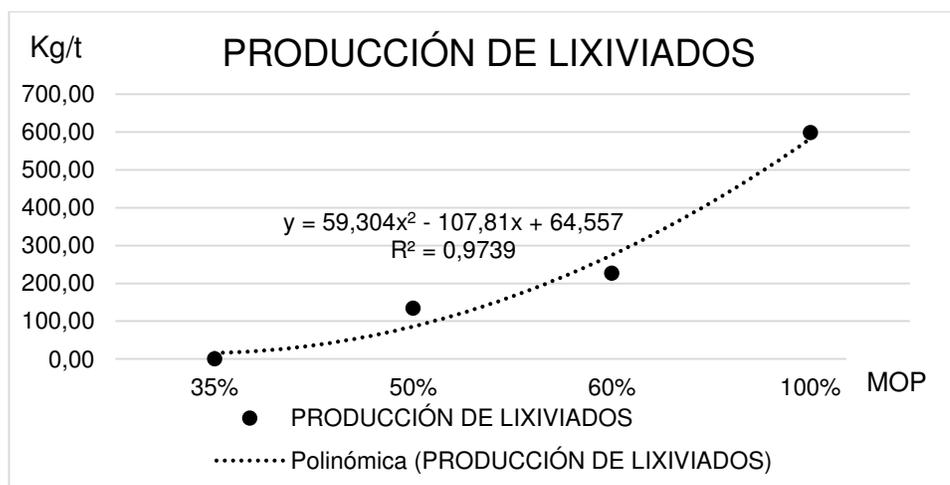
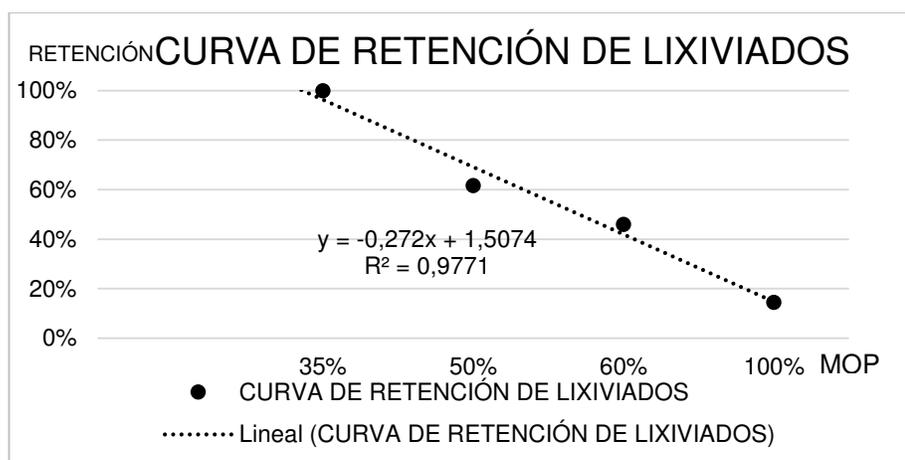


El Resto de la información contenida en este anexo puede ser visualizada en el siguiente link: https://1drv.ms/f/s!Asasolvqt8ergptMc4irD_pBP7H_nxg

ANEXO 9: MÉTODO TCHOBANOGLIOUS PROGRAMA HELP

Curvas Tchobanoglous

A	B	C	D	E=C-D	F=E/C x 100
% MOP	CONTENIDO DE HUMEDAD TOTAL 70%MOP	CONTENIDO DE LIXIVIADO TEORICO MÁXIMO (HUMEDAD TOTAL) (Kg/t)	PRODUCCIÓN DE LIXIVIADO (TCHBANOGLIOUS)	RETENIDO	% RETENIDO
35%	24,50%	245	0	245	100%
50%	35,00%	350	134,32	215,68	62%
60%	42,00%	420	226,71	193,29	46%
100%	70,00%	700	598,24	101,76	15%



Programa HELP

```

*****
*****
**
**
**          HYDROLOGIC EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE          **
**          HELP MODEL VERSION 3.07 (1 NOVEMBER 1997)                **
**          DEVELOPED BY ENVIRONMENTAL LABORATORY                    **
**          USAE WATERWAYS EXPERIMENT STATION                       **
**          FOR USEPA RISK REDUCTION ENGINEERING LABORATORY        **
**
**
*****
*****

```

```

PRECIPITATION DATA FILE:  C:\DATA4.D4
TEMPERATURE DATA FILE:   C:\DATA7.D7
SOLAR RADIATION DATA FILE: C:\DATA13.D13
EVAPOTRANSPIRATION DATA: C:\DATA11.D11
SOIL AND DESIGN DATA FILE: C:\DATA10.D10
OUTPUT DATA FILE:        C:\RCRA.OUT

```

TIME: 16: 7 DATE: 7/23/2018

```

*****
*****
TITLE: GUAYAQUIL SANITARY LANDFILL
*****

```

NOTE: INITIAL MOISTURE CONTENT OF THE LAYERS AND SNOW WATER WERE SPECIFIED BY THE USER.

LAYER 1

TYPE 1 - VERTICAL PERCOLATION LAYER
MATERIAL TEXTURE NUMBER 21

THICKNESS = 60.00 CM

POROSITY = 0.3970 VOL/VOL

FIELD CAPACITY = 0.0320 VOL/VOL

WILTING POINT = 0.0130 VOL/VOL

INITIAL SOIL WATER CONTENT = 0.1000 VOL/VOL

EFFECTIVE SAT. HYD. COND. = 0.300000012000 CM/SEC NOTE:

SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY IS MULTIPLIED BY 1.60
FOR ROOT CHANNELS IN TOP HALF OF EVAPORATIVE ZONE.

El resto de la información contenida en este anexo puede visualizarla en el siguiente link: <https://1drv.ms/f/s!Asasolvqt8ergptlMm3x8CQJJJ-9zg>

ANEXO 10: REGISTRO FOTOGRÁFICO

CARACTERIZACIÓN



CELDAS TIPO



LISÍMETROS



LABORATORIO MÉTODO DE DESECACIÓN



MÉTODO MGFRS



El resto de la información contenida en este anexo puede visualizarla en el siguiente link: <https://1drv.ms/f/s!Asasolvqt8ergptKivUeMVu9nZctjQ>