Memoria Justificativa

Regionalización de Rellenos Sanitarios en el Interior del país, con generación de energía eléctrica



Verónica Garicoits

Luciana Pan

Tutores:

Dra. Ing. Elizabeth González

MSc. Ing. Nicolás Rezzano

Dr. Ing. José Cataldo

Proyecto de Fin de Carrera

Julio 2016

Índice

1 Introducción 8
2 Generación de energía a partir del biogás 8
2.1 Modelos de generación de biogás 9
2.2 Comparación de los modelos 9
2.2.1 Descripción del caso de estudio, Rivera: 9
2.2.2 Comparación de resultados 12
2.3 Comparación de la extracción de biogás real y estimada 14
2.4 Elección y corrección de modelo 15
2.4.1 Descripción del caso de estudio, Las Rosas 16
2.4.2 Elección del modelo de generación de biogás 18
2.4.3 Factor de corrección 20
2.4.4 Valoración del recurso 23
2.5 Planta de recuperación del biogás 24
2.5.1 Descripción de los componentes del sistema 24
2.5.2 Costos de inversión y operación y mantenimiento 29
2.6 Generación de energía a partir del biogás en un RSa en funcionamiento a distintas escalas. 30
2.6.1 Generación de energía 31
2.6.2 Costos de inversión y operación y mantenimiento 34
2.6.3 Análisis financiero 35
2.6.4 Escenarios analizados 38
3 Análisis de opciones en Uruguay 46
4 Análisis de regionalización 47
4.1 Regionalización preliminar 47
4.1.1 Costos de transporte 48
4.1.2 Costos por disposición final 49
4.1.3 Determinación de la distancia máxima 49
4.1.4 Selección del caso de estudio 56
4.2 Análisis de costos para la región seleccionada (Rellenos locales/Relleno regional) 58
4.2.1 Inversión y diseño del RSa 58

4.2.2 Recolección y transporte 65
4.2.3 Operación y Mantenimiento 74
4.2.4 Generación de energía 79
4.2.5 Resultados y conclusiones 80
5 Anteproyecto 84
5.1 Localización del predio para el caso de estudio 84
5.2 Características del predio seleccionado 87
5.2.1 Parámetros determinados para el predio seleccionado 87
5.2.2 Determinación del área útil 89
5.3 Vida útil 90
5.4 Población servida y RS a disponer 90
5.5 Explotación del RSa 91
5.5.1 Ubicación de los módulos 91
5.5.2 Método de vertido y conformación de módulos 93
5.6 Calculo del lixiviado 93
5.6.1 Determinación del caudal de lixiviado 94
5.7 Tratamiento de lixiviado 98
5.7.1 Caracterización del efluente 98
5.7.2 Selección de la alternativa 107
5.7.3 Ingreso a la planta de tratamiento 111
5.7.4 Laguna de ecualización 111
5.7.5 Laguna anaerobia 113
5.7.6 Lagunas facultativas 114
5.7.1 Humedal 115
5.8 Conducción de lixiviados 118
5.9 Generación del biogás 118
5.9.1 Diseño del sistema de recolección de biogás 119
5.10 Generación de energía 120
6 Conclusiones 122
7 Bibliografía 124

Índice de Figuras

Figura 1.- Operación del RSa, Las Rosas 16
Figura 2.- Pozo construido durante la operación 17
Figura 3.- Cabezal, Las Rosas 17
Figura 4.- Central de desgasificación 18
Figura 5.- Antorcha (izquierda) y Motor de combustión interna (derecha) 18
Figura 6.- Cabezal dren Felipe Cardoso 25
Figura 7.- Cabezal dren Las Rosas 25
Figura 8.- Antorcha Felipe Cardoso 26
Figura 9.- Antorcha Las Rosas 26
Figura 10.- Carreras del pistón 28
Figura 11.- Delimitación de la Región 3 57
Figura 12.- Tuberías de conducción de lixiviado 61
Figura 13.- Ubicación rellenos sanitarios 66
Figura 14.- Equipos recolectores, modelo CS6 y chasis 69
Figura 15.- Tractor de cadenas, CAT D6T 75
Figura 16.- Cargador de cadenas, CAT 953 75
Figura 17.- Compactadora de residuos, CAT 816F 76
Figura 18.- Localización del predio 87
Figura 19.- Localización del predio 87
Figura 20.- Curvas piezométricas 88
Figura 21.- Área aprovechable del predio 89
Figura 22.- Planicie de inundación 92
Figura 23.- Esquema del balance hidrológico en la masa de residuos 94
Figura 24.- Esquema tratamiento 108
Figura 25.- Sistema de tratamiento en tiempo seco 109
Figura 26.- Sistema de tratamiento en tiempo de lluvia 110
Figura 27.- Sistema de tratamiento en eventos de gran magnitud 110
Figura 28.- Esquema típico de un humedal de FSSV 116
Figura 29.- Esquema en planta de las tuberías de distribución y recolección en humedales de flujo vertical 118
Figura 30.- Sistema de recolección de biogás 120

Índice de Tablas

Tabla 1.- Población de la ciudad de Rivera, proyectada a 2035 10
Tabla 2.- Caracterización de residuos urbanos en Uruguay 12
Tabla 3.- Cantidad de biogás a partir de RSU, resultados de los modelos 13
Tabla 4.- Extracción de biogás estimada y real - SCS Engineers, 2007 15
Tabla 5.- Extracción de biogás estimada y real - Terraza, Willumsen y Guimaraes, 2007 15
Tabla 6.- Comparación extracción de biogás estimada y real sin factor de corrección, Las Rosas .. 21
Tabla 7.-Comparación extracción de biogás estimada y real con factor de corrección, Las Rosas .. 22
Tabla 8.- Fracción rápida y lentamente degradable para distintas composiciones 23
Tabla 9.-Motor de combustión interna 28
Tabla 10.- Micro-turbinas 29
Tabla 11.- Ciclo combinado 29
Tabla 12.- Producción de biogás para diferentes escalas de población 31
Tabla 13.- Algunas características equipos de generación eléctrica 32
Tabla 14.- Potencia y energía máxima, según tecnología empleada 33
Tabla 15.- Total energía durante 40 años de funcionamiento 34
Tabla 16.- Viviendas abastecidas 34
Tabla 17.- Pérdida de biogás, módulos 1 año 40
Tabla 18.- Altura útil de los módulos 1 año para cada escala 40
Tabla 19.- Capacidad y utilización motores, módulos 1 año 40
Tabla 20.- Resumen análisis financiero- Financiación propia sin IRAE, módulos 1 año 41
Tabla 21.- Resumen análisis financiero- Financiación mixta con IRAE, módulos 1 año 41
Tabla 22.- Pérdida de biogás, módulos 5 años 43
Tabla 23.- Alturas de los módulos 5 años para cada escala 44
Tabla 24.- Capacidades y utilización motores, módulos 5 años 44
Tabla 25.- Resultados análisis financiero- Financiación propia sin IRAE, módulos 5 años 44
Tabla 26.- Resultados análisis financiero-Financiación mixta con IRAE, módulos 5 años 44
Tabla 27.- Distribución de las horas de trabajo 48
Tabla 28.- Cotos por disposición final, Evaluación Regional de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 49
Tabla 29.- Distancias y rutas entre localidades 55

Tabla 30.- Datos generales por localidad 59
Tabla 31.- Datos de los RSa 60
Tabla 32.- Caudales máximos de biogás 62
Tabla 33.- Resumen de costos inversión 64
Tabla 34.- Distancias al RSa 66
Tabla 35.- Costos operación y mantenimiento, relleno local 70
Tabla 36.- Costos operación y mantenimiento, relleno regional con ET 71
Tabla 37.-Costos operación y mantenimiento, relleno regional sin ET 71
Tabla 38.- Costo total VAN 20 años 71
Tabla 39.-Costos US$/ton, recolección y transporte 72
Tabla 40.- Costos por distancia al relleno regional 72
Tabla 41.- Maquinaria y vehículos considerados 76
Tabla 42.- Recursos humanos, operación y mantenimiento 77
Tabla 43.- Costo OyM por tonelada dispuesta 78
Tabla 44.- Motores de combustión interna seleccionados para cada etapa del relleno regional ... 80
Tabla 45.- Resultados 80
Tabla 46.- Porcentajes representativos 82
Tabla 47.- Costos totales 82
Tabla 48.- Tarifas GIRSU 82
Tabla 49.- Criterios de aptitud y exclusión 86
Tabla 50.- Descripción padrón seleccionado 86
Tabla 51.- Niveles freáticos 88
Tabla 52.- Población y Residuos a disponer anualmente 91
Tabla 53.- Percentiles de la serie de lixiviado anual, con lluvias 95
Tabla 54.- Percentiles de la serie de lixiviado mensual, con lluvias 96
Tabla 55.- Percentiles, series de datos 101
Tabla 56.- Concentraciones de diseño 101
Tabla 57.- Percentiles de la serie de lixiviado mensual, en tiempo seco 103
Tabla 58.- Caudales y concentraciones de diseño 103
Tabla 59.- Serie de concentraciones de Nitrógeno Total de Las Rosas por percentil 105
Tabla 60.- Concentraciones de diseño y eficiencias en remoción, Nitrógeno Total 105
Tabla 61.- Parámetros medidos en el lixiviado previo al tratamiento 106

Tabla 62.- Metales pesados medidos en el lixiviado previo al tratamiento 106
Tabla 63.- Valores limites admitidos por el Decreto 253/79. 107
Tabla 36.- Permanencia caudales de diseño 112
Tabla 64.- Tasas de aplicación volumétrica, Mara 1997 113
Tabla 65.- Valores limites para Nitrógeno según la modificación del Decreto 253/79 117
Tabla 66.- Resultados de generación de metano y biogás 119
Tabla 67.- Potencia necesaria y Energía eléctrica generada con motor de combustión interna ... 121

Acrónimos

ALC: América Latina y el Caribe

DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente

EPA: Environmental Protection Agency

GEI: Gases de Efecto Invernadero

IRAE: Impuesto a la Renta de Actividades Económicas

MCI: Motor de Combustión Interna

MVOTMA: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

RAEE: Registro de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

RS: Residuos Sólidos

RSa: Relleno Sanitario

RSD: Residuos Sólidos Domésticos

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

SDF: Sitio de Disposición Final

1 Introducción

El éxito de la gestión de residuos radica en planificar sus distintas etapas con una visión integradora de las mismas. Particularmente en nuestro país la disposición final de residuos es una de las etapas que presenta mayores carencias, ya que se le presta un bajo nivel de atención.

Actualmente, en la mayoría de los departamentos la operación está basada en vertederos a cielo abierto. Los residuos dispuestos de este modo causan impactos ambientales negativos, tales como la generación de gases, contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas como consecuencia del lixiviado y proliferación de vectores, entre otros. A estos se agregan los inconvenientes que provienen del escaso control en cuanto al tipo de residuos recibidos, pudiendo disponerse en estos sitios residuos sólidos potencialmente peligrosos.

La búsqueda de alternativas que permitan mejorar y solucionar los problemas asociados a la gestión de residuos que enfrentan varios departamentos del interior del país, es la principal motivación del presente proyecto.

En los últimos años el Uruguay se ha planteado una nueva política energética que busca diversificar su matriz, fomentando la apertura hacia fuentes renovables no tradicionales. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone un análisis regional de los sitios de disposición final en el interior del país, orientado hacia la generación de energía, acompañando la tendencia planteada a nivel nacional en materia energética.

Asimismo, se pretende abordar el análisis de regionalización como parte de una estrategia integradora de las etapas de la gestión de residuos, con la finalidad de optimizar los servicios de recolección y transporte.

2 Generación de energía a partir del biogás

El biogás es un subproducto de la descomposición de residuos biodegradables. Su principal componente es metano (60 %), que se caracteriza por tener un alto poder calorífico, así como también por ser un gas de efecto invernadero (GEI) con un potencial de calentamiento atmosférico 21 veces mayor al dióxido de carbono (CO_2).Por lo tanto, capturando este gas no sólo es posible reducir las emisiones de GEI, sino que también puede ser utilizado como una fuente no convencional de energía, desplazando el uso de combustibles fósiles.

El relleno está compuesto por residuos de distinto tipo y edad que se degradan a diferentes tasas, en consecuencia la producción de biogás varía considerablemente de un relleno a otro, en función de la situación individual de cada uno.

2.1 Modelos de generación de biogás

Para poder utilizar el biogás como fuente de energía renovable es necesario conocer el potencial de generación del sitio de disposición final, el que dependerá de varios factores como el clima, composición de residuos ,humedad, cobertura y densidad de compactación, entre otros.

Conforme a lo anterior se han desarrollado varios modelos que estiman la producción de biogás con diferentes grados de exactitud y a partir de diversas variables, dentro de los cuales cabe mencionar: modelos de estimación estequiométrica, de orden cero, primer orden/multifase.

Los resultados obtenidos con el modelo de orden cero no son totalmente confiables siendo los modelos de mayor orden los que presentan menores diferencias cuando se comparan con los datos medidos en la realidad.

Debido a la complejidad de los modelos numéricos y matemáticos, se desarrollaron modelos empíricos, los cuales se basan en la misma teoría pero los procesos de cálculo han sido simplificados en cierto grado. Además, la inexactitud de muchos de los parámetros que utilizan los modelos numéricos, hacen que no sean mucho más precisos que los modelos simplificados.

2.2 Comparación de los modelos

En esta Sección se compararán los resultados entregados por los diferentes modelos presentados en la Sección 2.5 de la Memoria de Estudios Básicos, aplicados a un caso de estudio particular.

2.2.1 Descripción del caso de estudio, Rivera:

Para realizar el análisis se seleccionó la ciudad de Rivera, capital del departamento homónimo, ubicada al norte del País.

Se considerará un relleno sanitario con una vida útil de 20 años.

Los datos a considerar para la aplicación de los diferentes modelos se detallan a continuación:

2.2.1.1 Tasa de generación de residuos

La tasa de generación de residuos se determinó a partir de los datos[1] de población servida y toneladas de residuos por día que ingresan al sitio de disposición final de Rivera.

Población servida (hab)	76.795
Generación (ton/día)	66,7
Tasa de generación (kg/hab/día)	0,87

[1] Fuente: Uruguay Integra CSI-Pittamiglio

[2] Fuente: Consumo de Servicios de Energía y Agua en la población uruguaya, Instituto de Economía. Agosto

2.2.1.2 Población

Una vez determinada la tasa de generación por habitante es necesario saber cómo será el crecimiento de la población para poder estimar la cantidad de residuos que serán depositados en el RSa durante su vida útil.

A partir de los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) de proyección de la población en el departamento hasta el 2025, se proyectó el crecimiento de la población en su capital asumiendo que la misma seguirá el mismo comportamiento que el Departamento.

Luego, a partir del 2026 hasta el 2035 no se tenían datos, pero observando la tendencia de crecimiento de los datos proyectados por el INE, se asumió un crecimiento lineal.

Año	Población	Año	Población
2011	64.465	**2024**	66.467
2012	64.672	**2025**	66.567
2013	64.868	**2026**	66.832
2014	65.053	**2027**	66.981
2015	65.228	**2028**	67.131
2016	65.394	**2029**	67.280
2017	65.552	**2030**	67.430
2018	65.704	**2031**	67.579
2019	65.849	**2032**	67.729
2020	65.988	**2033**	67.878
2021	66.119	**2034**	68.028
2022	66.243	**2035**	68.178
2023	66.359		

Tabla 1.- Población de la ciudad de Rivera, proyectada a 2035

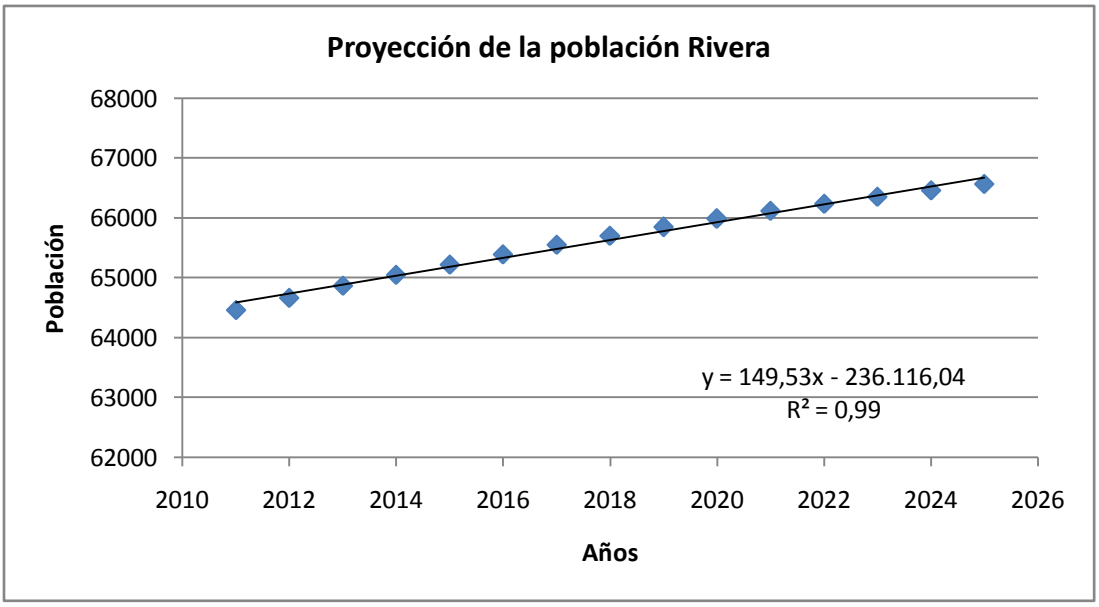


Gráfico 1.- Proyección Población

2.2.1.3 Composición de los residuos

Para determinar la composición de los residuos, se analizaron datos propuestos por diferentes fuentes:

- "Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana" – FICHTNER-LKSur, 2005, [11]

- "Proceso técnico y político para la definición de una estrategia para instrumentar una solución consensuada a la disposición final de residuos sólidos urbanos en Uruguay" – María José González, 2012, [12]

- "Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos", Informe 2: Canelones, San José, Melo, Tacuarembó, Salto y Paysandú – LKSur, 2013, [13]

Composición de los residuos: Composición (%) peso			
Fuente	[11]	[12]	[13]
Plásticos	13,9%	19,5%	16%
Vidrio	2,8%	2,9%	3,5%
Textiles	2,1%	7,3%	3,5%
Metales	1,2%	2,5%	2,9%
Papel	6,8%	6,6%	14,6%
Cartón	2,2%	8,7%	
Materiales orgánicos	47,9%	11,7%	41,7%
Madera, ramas de árboles	0,6%	11,8%	3,4%
Cuero, goma	0,6%	0,4%	1,7%
Otros	21,9%	28,6%	12,4%

Tabla 2.- Caracterización de residuos urbanos en Uruguay

Para el caso de estudio se considerarán los datos de [13]ya que es la más reciente y el estudio comprende departamentos del interior del País, siendo ésta la caracterización más representativa.

2.2.2 Comparación de resultados

El desarrollo del procedimiento de cálculo y los datos de entrada para cada uno de los modelos se presenta en la Sección 1, Memoria de cálculo.

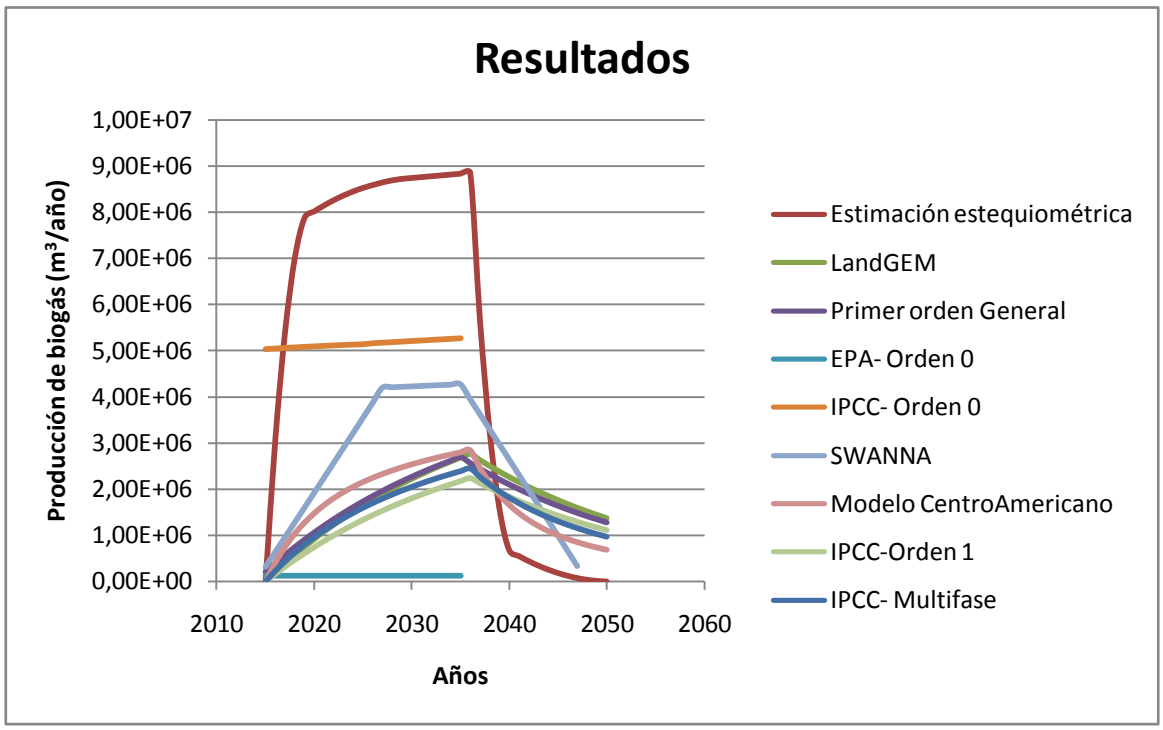


Gráfico 2.- Generación de biogás a partir de RSU, comparación de resultados para la ciudad de Rivera

Modelos	Total biogás (m^3)	Producción máx. (m^3/año)
Estimación estequiométrica		
Estimación estequiométrica	1,83E+08	8,85E+06
Modelos de orden cero		
IPCC - Orden 0	1,08E+08	5,26E+06
EPA - Orden 0	2,51E+06	1,22E+05
SWANNA	4,44E+07	4,26E+06
Modelos de primer orden y multifases		
Modelo Centroamericano	6,82E+07	2,84E+06
LandGEM	8,89E+07	2,77E+06
Primer orden General	8,62E+07	2,69E+06
IPCC - Orden 1	6,10E+07	2,23E+06
IPCC- Multifase	6,32E+07	2,44E+06
Promedio	8,11E+07	4,27E+06

Tabla 3.- Cantidad de biogás a partir de RSU, resultados de los modelos

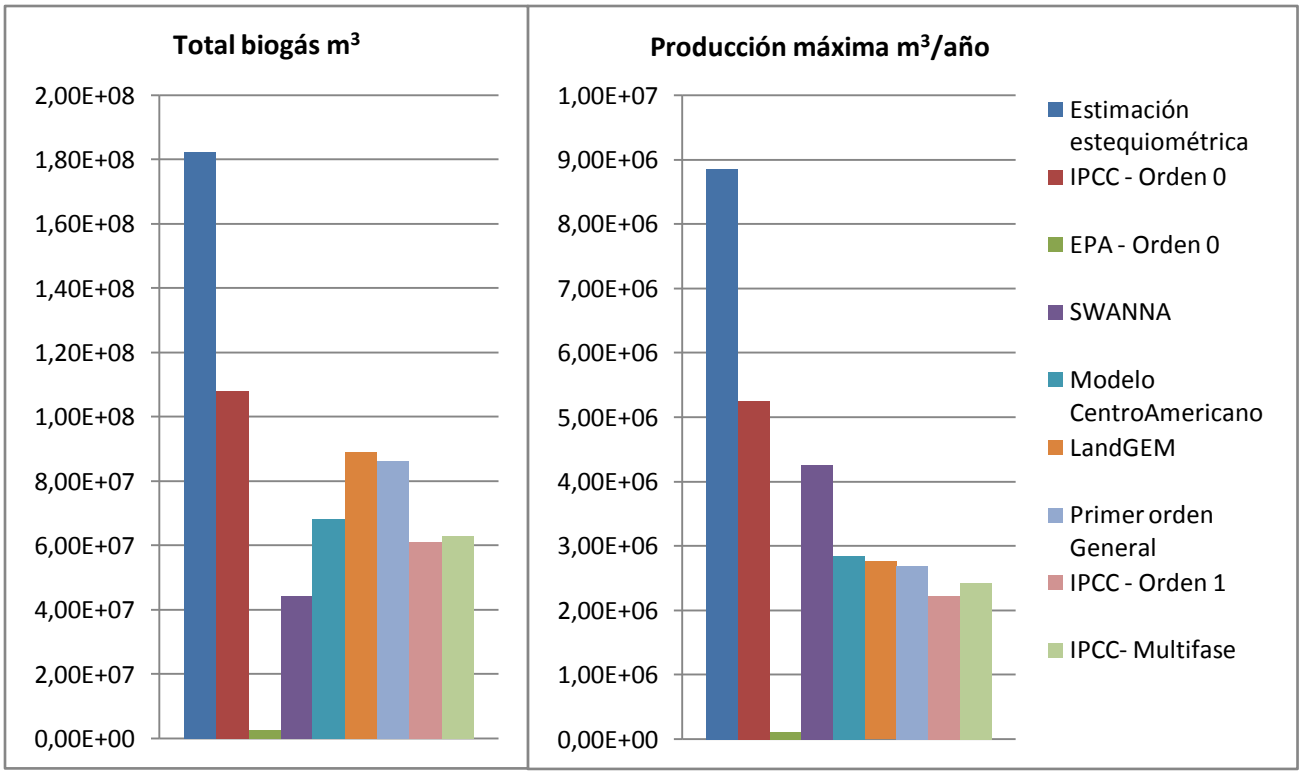


Gráfico 3.- Producción máxima y total biogás

En general se obtuvieron resultados del mismo orden tanto para la producción máxima como para el total de biogás generado, a excepción de la estimación estequiométrica que entrega valores

superiores a los de los restantes modelos y el modelo de la EPA de Orden cero que, por el contrario, entrega valores considerablemente menores.

Se destaca que tanto el modelo IPCC de Orden cero como el SWANNA, debido a las grandes simplificaciones que suponen, no representan correctamente la generación de biogás año a año, pero sí permiten obtener valores de producción máxima y total de biogás aproximados a los obtenidos por los otros modelos.

Se observa una gran similitud en los resultados obtenidos por los modelos de primer orden y multifase, ver Gráfico 4.

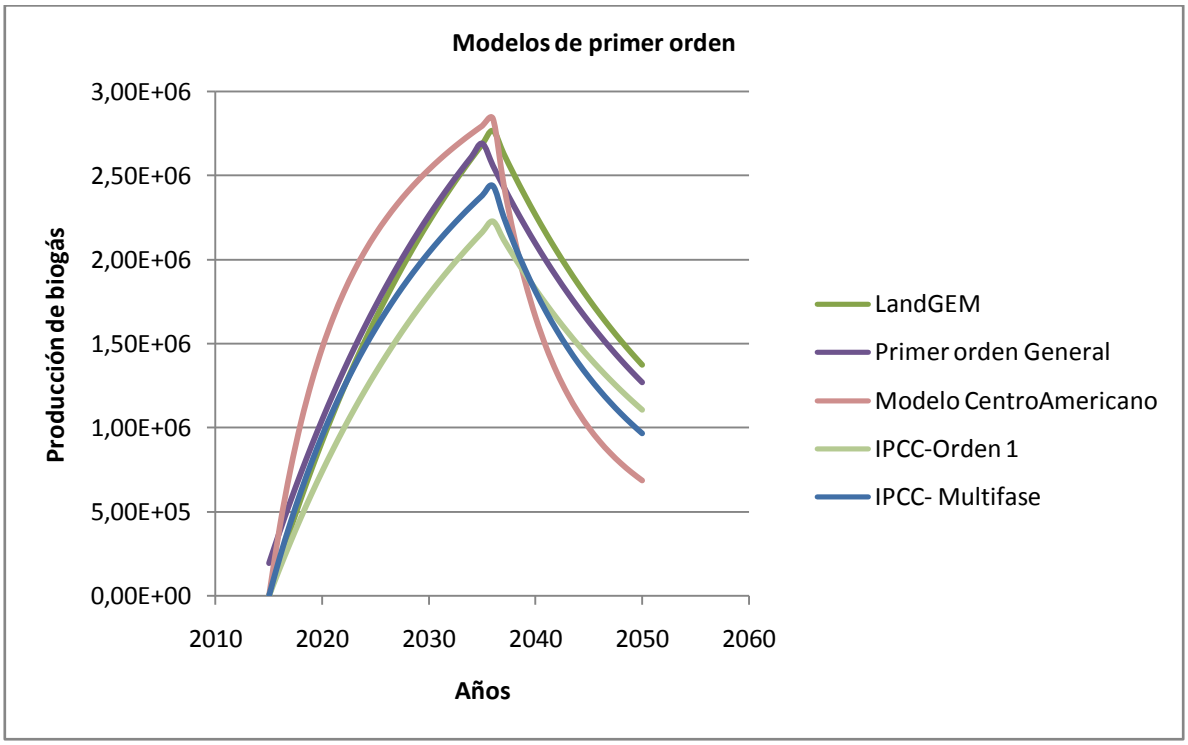


Gráfico 4.- Generación de biogás a partir de RSU, comparación resultados modelos de primer orden

2.3 Comparación de la extracción de biogás real y estimada

A nivel mundial existen alrededor de 1.200 plantas de biogás que se encuentran operativas utilizándolo con fines energéticos, [14]. En la mayoría de estas experiencias, aproximadamente el 75 %, la captación real de biogás obtenida se encuentra por debajo de la estimación realizada a partir de los modelos de generación.

Esto se debe principalmente a que el sistema biológico responsable de la degradación de los residuos dentro del RSa, es extremadamente complejo y sensible a muchos parámetros. Pudiendo presentarse diferentes problemas como ser el condensado en el sistema de tuberías, insuficiente compactación de los residuos, mala calidad del material de cobertura permitiendo la entrada de aire, entre otros.

Existen dos estudios, [19] y [20] donde se analizaron las diferencias entre el rendimiento estimado y real. En ambos estudios se destaca una sobre estimación de la extracción de biogás, en algunos casos debido a que los modelos o parámetros utilizados eran demasiado optimistas y en otros debido al bajo rendimiento.

En [19] se analizaron 14 proyectos, donde se obtuvo para todos los casos valores de extracción real menores a los estimados y en promedio la real fue de un 40 % de la estimada. En la Tabla 4, a continuación se muestran los resultados del estudio:

Año	Número de plantas de biogás evaluados cada año	Extracción de biogás estimada (m^3/h)	Extracción de biogás real (m^3/h)	Comparación de la extracción de biogás estimada y real (%)
2003	1	558	334	59,9
2004	3	23655	13308	56,3
2005	8	51557	20027	38,8
2006	11	48808	14820	30,4
2007	2	2317	1725	74,5
TOTAL	25	126895	50214	39,6

Tabla 4.- Extracción de biogás estimada y real - SCS Engineers, 2007.

En [20] se analizaron 6 proyectos de biogás, dentro de los cuales se encuentra el RSa de Las Rosas. Solamente uno de los proyectos presentó una extracción mayor a la estimada.

Planta	Extracción de biogás estimada (m^3x10^3/año,2006)	Extracción de biogás real (m^3x10^3/año,2006)	Comparación de la extracción de biogás estimada y real (%)
Sao Pablo, Brasil	215000	103000	47,9
Buenos Aires, Argentina	116500	13100	11,2
Monterrey, Mexico	15340	41230	268,8
Maldonado, Uruguay	1963	1496	76,2
Liepaja, Latvia	696	561	80,6
Olavarría, Argentina	3408	677	19,9

Tabla 5.- Extracción de biogás estimada y real - Terraza, Willumsen y Guimaraes, 2007

2.4 Elección y corrección de modelo

Se observa una gran variabilidad en la relación de extracción de biogás estimada y real, para los diferentes rellenos. Se busca entonces hallar un factor de corrección del modelo que tenga en cuenta la posible sobreestimación del mismo.

Actualmente en nuestro país se encuentra en funcionamiento un proyecto de planta de generación de energía a partir del biogás ubicado en el RSa de Las Rosas, Maldonado. Los resultados obtenidos en dicha experiencia son muy valiosos, ya que permiten corregir los modelos teóricos para que representen las condiciones de la región.

Debido a esto, se seleccionará uno de los modelos analizados en la Sección 2.2 y se aplicará en el caso puntual del RSa de Las Rosas, para el cual se tienen series de datos de extracción de biogás real desde el año 2005 hasta el 2014 y toneladas de residuos dispuestas desde el año 1997.Los datos de Las Rosas permitirán comparar los resultados de las mediciones reales de biogás captado con las estimaciones del modelo, con el objetivo de hallar un factor de corrección, que tenga en cuenta la posible sobreestimación del modelo.

2.4.1 Descripción del caso de estudio, Las Rosas

2.4.1.1 Relleno Las Rosas

El SDF de Las Rosas, se encuentra ubicado en el departamento de Maldonado, emplazado en una zona rural a 10 km de la capital departamental y a 4 km de San Carlos. Se encuentra operativo desde el año 1990, operando como vertedero hasta el año 1997. A partir de este año comenzó a funcionar como relleno sanitario, operado por la empresa Aborgama. Actualmente se está trabajando en el módulo 4A, habiéndose clausurado los módulos 1, 2, INT1, INT2, 3A y 3B.

En el relleno se disponen todos los residuos urbanos generados en el departamento, quedando excluidos los residuos de poda, escombros, residuos de obras civiles y chatarra en general, que se disponen en otros de los siete SDF distribuidos en el departamento.



Figura 1.- Operación del RSa, Las Rosas

En el año 2005, se pone en funcionamiento la planta de generación de energía eléctrica a partir del biogás, que fue financiado por medio de una donación del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM/GEF) con el objeto de difundir la experiencia en el país y en la región. Tuvo

además aportes de la Intendencia Departamental de Maldonado (IDM) que es propietaria del proyecto.

La energía eléctrica producida es vendida a UTE, empresa de energía eléctrica estatal con la cual se firmó un convenio.

Se realizó una visita al RSa de Las Rosas el 26 de Noviembre de 2015, con el fin de conocer en mayor profundidad la experiencia en generación de energía eléctrica que allí se lleva a cabo. La misma, fue guiada por el Ing. Federico Steffenino (Intendencia de Maldonado) e Ing. Pablo Zamonsky (Aborgama).

2.4.1.2 Descripción de la instalación.

El sistema de captación está compuesto por 93 pozos verticales y 2 horizontales. Los pozos, de 50 cm de diámetro, están rellenos de piedra partida, tienen una tubería central perforada de PEAD PN10 y profundidad media de 15 m.

Algunos de los pozos verticales fueron construidos durante la operación, en conjunto con el avance del relleno.

Cada pozo tiene un cabezal con una válvula que permite regular la presión y medir caudal, temperatura y presión. En un radio de 3 metros del cabezal se instala una membrana de PEAD como barrera para la entrada de aire cuando se somete el pozo a depresión.



Figura 2.- Pozo construido durante la operación



Figura 3.- Cabezal, Las Rosas

La central de desgasificación recibe al colector principal, que cuenta con un control individual por línea, de la calidad del biogás (% CH_4 y O_2), y su apertura depende de la misma. La succión se realiza mediante ventiladores centrífugos; la planta cuenta con dos equipos de 500 Nm^3/h, uno en

operación y otro de reserva. La presión de salida está determinada según el destino del biogás: quema en antorcha o generación eléctrica.



Figura 4.- Central de desgasificación

Respecto al sistema de utilización, Las Rosas cuenta con dos generadores de 0.5 MW, movidos por motores de combustión interna y una antorcha que se pone en funcionamiento en caso que la generación de energía esté fuera de servicio.





Figura 5.- Antorcha (izquierda) y Motor de combustión interna (derecha)

2.4.2 Elección del modelo de generación de biogás

Como se mencionó anteriormente, los modelos de primer orden son los que representan mejor la cinética de la degradación de residuos y por lo tanto estiman con mayor exactitud la generación de biogás año a año. Por lo tanto, se procede a aplicar este tipo de modelos para el caso de Las Rosas.

Debido a la gran similitud que presentaron los modelos de primer orden en el análisis de comparación, ver Sección 2.2.2., se opta por utilizar y corregir el modelo General, implementado en una planilla de elaboración propia, basado en la ecuación de degradación de primer orden.

Utilizar este modelo permite tener mayor libertad a la hora de realizar modificaciones y tener mejor comprensión del procedimiento de cálculo llevado a cabo para estimar el biogás generado, ya que el resto de los modelos estudiados propuestos por el IPCC y la EPA, cuentan con una hoja de cálculo protegida que limita su modificación, pudiendo únicamente variar los parámetros de entrada, siendo una especie de modelo "caja negra" que impide comprender en profundidad cómo se procesa la información de entrada al modelo.

A su vez, se considerarán dos fases de degradación ya que, como fue mencionado anteriormente, en la realidad los diferentes componentes de los residuos se degradan a diferentes velocidades. Por lo tanto, cuanto más fases se consideren es lógico obtener mejores aproximaciones a la degradación real que tiene lugar en el relleno y en consecuencia, una mejora en los resultados del modelo.

La planta de biogás de Las Rosas fue diseñada y construida utilizando un modelo propio para estimar el potencial de extracción de biogás en el sitio, sobre el cual no se pudo obtener información detallada. Sin embargo, a fines del 2005 los ingenieros que trabajan en Las Rosas modelaron nuevamente la extracción de biogás utilizando el modelo de decaimiento de primer orden de la EPA. Para dicha modelación se utilizaron valores de k de 0,28 y 0,056 año^{-1}, dependiendo de la velocidad de degradación y un potencial de generación de metano L_0= 94 m^3/ton, [20].

Aplicación del modelo

A continuación se presenta la ecuación empleada para el modelo General para dos fases de degradación:

$$G_{CH_{4,n}} = \left[F_l \cdot \sum_{t=c}^{n-1} k_i^l L_0 M_{i,t} e^{-k_i^l (n-t)} + F_r \cdot \sum_{t=c}^{n-1} k_i^r L_0 M_{i,t} e^{-k_i^r (n-t)}\right] \cdot f_c$$

Siendo:

- Potencial de generación de metano: L_0= 94 m^3/ton
- Tasa de generación de metano para la fracción lentamente degradable: k^l = 0,056 año^{-1}
- Tasa de generación de metano para la fracción rápidamente degradable: k^r = 0,28 año^{-1}
- Porcentaje de residuos lentamente degradable: F_l = 9 %
- Porcentaje de residuos rápidamente degradable: F_r = 56 %
- $M_{i,t}$: toneladas de residuos sólidos dispuestos o proyectados a disponer de la fracción *i* en el año *t*
- Factor de corrección

Para los valores de k y L_0 de la fracción rápida y lentamente degradable se seleccionaron los valores utilizados para la modelación de Las Rosas, los cuales representan con mayor exactitud las condiciones climáticas de la región y las características de composición de los residuos, que las recomendaciones bibliográficas.

Asimismo, los porcentajes de residuos lentamente y rápidamente degradables utilizados fueron los calculados para la estimación estequiométrica; el procedimiento se detalla en la sección 1.2 de la memoria de cálculo.

2.4.3 Factor de corrección

Según comunicación personal con el Ing. Pablo Zamonsky, en el relleno de Las Rosas los modelos de generación de biogás utilizados sobreestiman considerablemente la cantidad de biogás producido respecto a las mediciones reales, debido a esto, suelen utilizar un factor de corrección.

El principal efecto que queda comprendido en este factor de corrección es de las sequías, que ocasionan la formación de grietas en la cobertura superior, lo que provoca una disminución en la cantidad y calidad del biogás.

Las grietas en la cobertura superior constituyen una ruta preferencial para el biogás, que cuando esto ocurre se libera hacia la atmósfera. Este fenómeno se da, donde la presión es positiva, fuera del radio de influencia de los pozos de captación.

Por otro lado la mayor permeabilidad de la tapada superior y la presión negativa en el radio de influencia de los pozos tiene como resultado el ingreso de aire. El oxígeno es indeseable por un tema de seguridad, para evitar la mezcla explosiva de metano y oxígeno en las líneas de conducción del biogás y por otro lado, disminuye la calidad del biogás.

Otro efecto a destacar el conocido como “over pull”, que se da por el ingreso del aire en la zona más lejana del radio de influencia del pozo, esto ocasiona que se dé una descomposición aerobia de la materia orgánica presente en dicha zona. Por lo tanto no se genera metano y por otra parte la M.O. al ser degradada rápidamente en forma aerobia pierde su aporte metanogénico. Asimismo, las bacterias aerobias sustituyen a las anaerobias por un largo tiempo y la recuperación del pozo es muy lenta.

Por otro lado, este factor también tiene en cuenta posibles fallas en la operación del relleno respecto a la cobertura diaria, ya que en los días de lluvia el escurrimiento dificulta enormemente las tareas (Federico Steffenino, 2015).

Estos factores de corrección suelen ser muy robustos, por ejemplo, las recomendaciones del IPCC indicar utilizar 50 %. Por lo tanto la calibración del modelo no se centrará tanto en los valores de k y L_0, ya que el efecto de los mismos es despreciable frente a la corrección que se realiza a posteriori, sino que se enfocará más en verificar si la corrección propuesta ajusta bien los valores a la estimación del modelo.

Procesamiento de los datos reales

A partir de los datos de valores mensuales en m^3 de biogás captado, estos valores fueron acumulados anualmente para poder ser comparables con los resultados entregados por el modelo en m^3/año. Luego se calculó el biogás generado asumiendo una eficiencia de recolección del 70% que es la eficiencia promedio de Las Rosas.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Año	Extracción real (m3/año)	Extracción estimada (m3/año)	Comparación de la extracción de biogás estimada y real (%)
2005	2,38E+06	2,22E+06	107%
2006	1,50E+06	2,38E+06	63%
2007	1,44E+06	2,54E+06	57%
2008	1,45E+06	2,68E+06	54%
2009	1,56E+06	2,81E+06	56%
2010	1,22E+06	2,95E+06	41%
2011	1,62E+06	3,13E+06	52%
2012	1,54E+06	3,33E+06	46%
2013	1,61E+06	3,54E+06	46%
2014	2,09E+06	3,70E+06	57%
TOTAL	1,64E+07	2,93E+07	56%

Tabla 6.- Comparación extracción de biogás estimada y real sin factor de corrección, Las Rosas

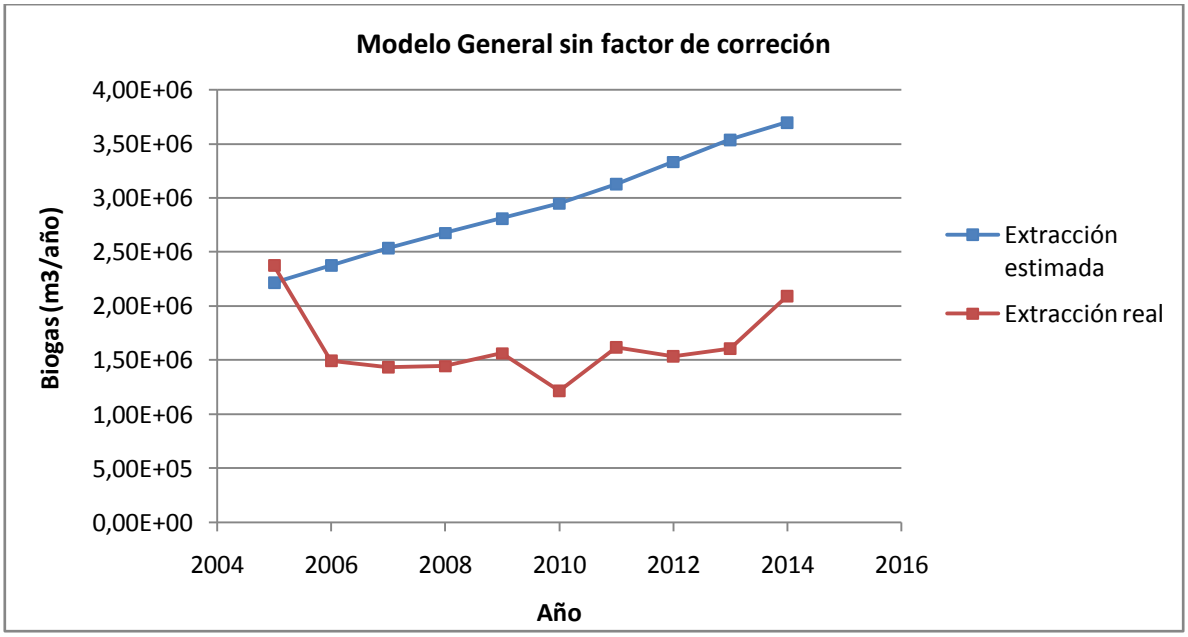


Gráfico 5.-Modelo General sin factor de corrección, Las Rosas

Se puede observar un pico en la extracción real en el año 2006, al comienzo de la captación de biogás, siendo este el único caso donde se superó el valor estimado por el modelo. El factor de corrección se calculó como la relación entre la suma de biogás extraído real y estimado, a lo largo de los años analizados, obteniéndose FC=0,56.

Aplicando dicho factor se obtuvieron los siguientes resultados:

Año	Extracción real (m3/año)	Extracción estimada (m3/año)	Diferencia
2005	2,38E+06	1,24E+06	-1,14E+06
2006	1,50E+06	1,33E+06	-1,63E+05
2007	1,44E+06	1,42E+06	-1,43E+04
2008	1,45E+06	1,50E+06	5,37E+04
2009	1,56E+06	1,57E+06	1,01E+04
2010	1,22E+06	1,65E+06	4,35E+05
2011	1,62E+06	1,75E+06	1,31E+05
2012	1,54E+06	1,87E+06	3,29E+05
2013	1,61E+06	1,98E+06	3,71E+05
2014	2,09E+06	2,07E+06	-2,33E+04

Tabla 7.-Comparación extracción de biogás estimada y real con factor de corrección, Las Rosas

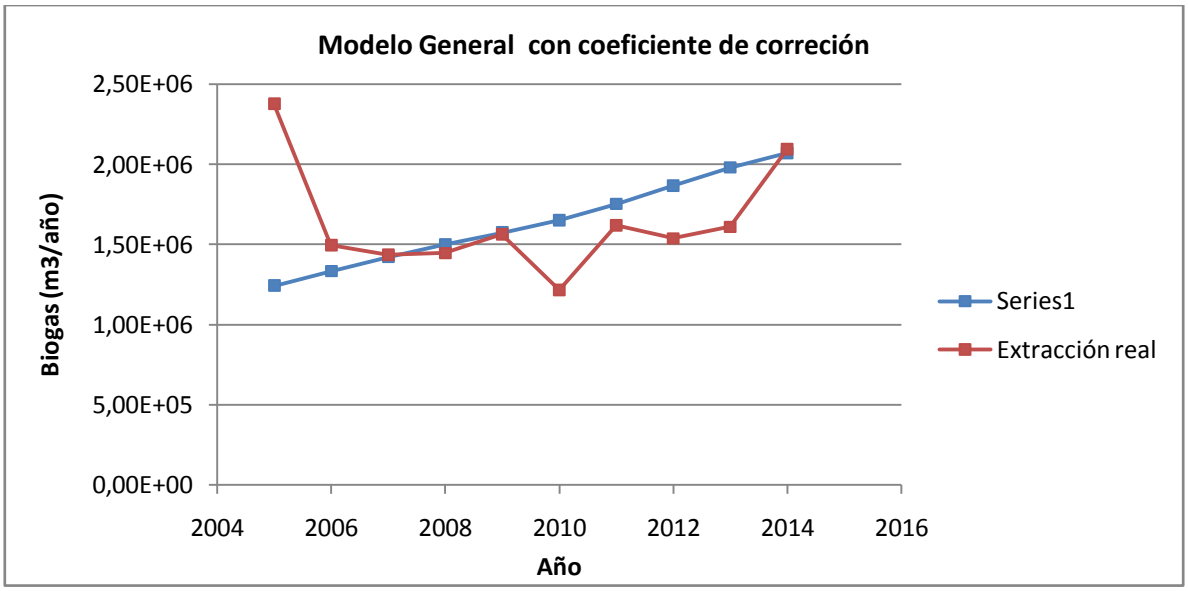


Gráfico 6.-Modelo General con factor de corrección, Las Rosas

Se observa que si no se aplica el coeficiente de corrección, los valores estimados por el modelo se alejan considerablemente de las mediciones reales.

Por otro lado, al aplicar un coeficiente de 0,56 mejora considerablemente la estimación del modelo respecto a las mediciones reales.

Para los posteriores casos de análisis, para estimar la generación de biogás se utilizará el modelo de Primer Orden Multifase con un coeficiente de corrección de 0,56.

2.4.4 Valoración del recurso

Uno de los factores principales del análisis realizado es el del recurso, siendo éste el Biogás. Además de jugar un rol importante en cuanto a las emisiones atmosféricas, es el combustible del sistema de generación de energía, con lo cual, sin biogás no se podrá producir energía eléctrica. Por estas razones, es de relevancia analizar la fuente de generación de biogás, los Residuos Sólidos.

La composición de los residuos determina las características del biogás a producir y su cantidad. Como se vio en la sección 2.2.1, la caracterización de los residuos es un dato de entrada para el cálculo de la generación de biogás.

Como se detalla en la Tabla 2, existen diversas fuentes que describen dicha composición de los residuos, que a su vez varía en función de la región que se considere.

En particular, en este caso de estudio se obtuvieron datos entregados por diferentes fuentes en cuanto a la composición de los residuos. Para la ciudad de Montevideo la información recabada correspondía a distintos años (2005 y 2012) y fuentes. Se observaron grandes diferencias, sobre todo en la cantidad de material orgánico (47,9 % y 11,7 % respectivamente). Por otro lado, a partir de los datos de composición de residuos para diversas localidades del interior del país (Canelones, San José, Melo, Tacuarembó, Salto y Paysandú), [13] en dicha fuente se presenta una composición promedio, la cual fue empleada para determinar la producción de biogás en los distintos casos de estudio planteados.

Con la información de las tres fuentes consultadas se pudo observar las diferencias que puede presentar la composición de los residuos en función de la región, inclusive dentro de un mismo país. A partir de dichas composiciones se determinó, como se detalla en la sección 1.2 de la Memoria de Cálculo, la fracción rápida y lentamente degradable, que se presentan en la Tabla 8.

	Fuente [11]	**Fuente [12]**	**Fuente [13]**
% Rápidamente degradable	57 %	27 %	56 %
% Lentamente degradable	3 %	20 %	9 %

Tabla 8.- Fracción rápida y lentamente degradable para distintas composiciones

Luego, se estimó el biogás producido con el Modelo General Multifase corregido, obteniéndose los resultados que se presentan en el Gráfico 7a continuación.

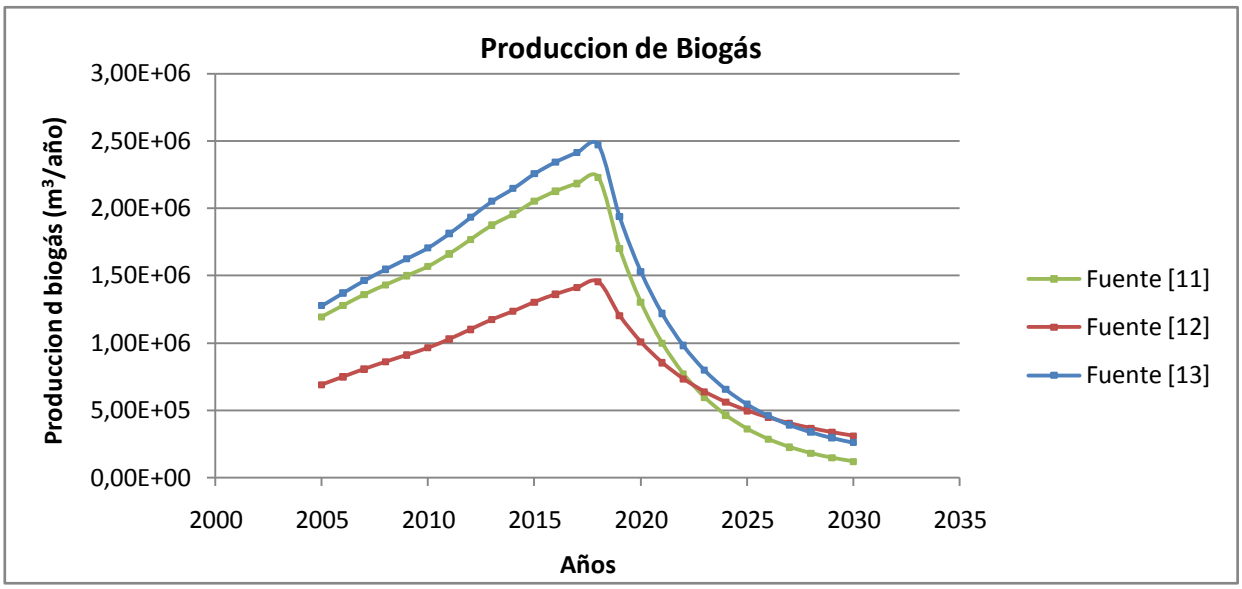


Gráfico 7.- Producción de biogás para las distintas composiciones de residuos

Como se puede observar del gráfico anterior, la información sobre la composición de los residuos es de gran importancia e incide fuertemente en la producción de biogás, pudiendo conducir a graves errores en el dimensionado de los equipos de generación de energía si no se cuenta con datos confiables.

2.5 Planta de recuperación del biogás

2.5.1 Descripción de los componentes del sistema

Una planta de recuperación de biogás se compone de un sistema de extracción, conducción y de utilización del mismo.

2.5.1.1 Sistemas de extracción

La extracción del biogás en general se realiza a través de chimeneas (tubos perforados) verticales y horizontales, también existen otros sistemas como la recolección del biogás producido bajo una membrana que cubre el relleno.

Las chimeneas verticales normalmente son tuberías de PVC 100 – 160 mm perforadas colocadas en un pozo de 50 – 100 cm de diámetro que se rellena con grava alrededor de la tubería.

El radio de influencia de los pozos depende de varios factores como la presión de succión del pozo, compactación, tipo de residuos, flujo de salida de biogás, profundidad del pozo y del SDF, entre otros. La determinación de la separación es compleja ya que no existe uniformidad en la masa de residuos, los valores típicos recomendados de separación entre tuberías están entre 50 – 60 m.

Las chimeneas horizontales se instalan excavando una zanja horizontal en los residuos sólidos después de completar dos o más niveles.

En RSa adecuadamente construidos con celdas cerradas, los sistemas de extracción vertical y horizontal extraen la misma cantidad de biogás.

La ventaja de instalar chimeneas horizontales, es que se pueden instalar desde el inicio del llenado de las celdas y extraer el biogás desde el principio de la operación del relleno. Por otro lado, los principales problemas que presentan las tuberías horizontales es la posibilidad de ingreso de lixiviado y de roturas debido al peso de las máquinas de compactación.

Las chimeneas verticales son fáciles de instalar después que el módulo es cerrado; esto no es posible con chimeneas horizontales.

En algunas instalaciones se han utilizado los dos tipos de chimeneas, por ejemplo en Las Rosas.



Figura 6.- Cabezal dren Felipe Cardoso



Figura 7.- Cabezal dren Las Rosas

La succión puede realizarse mediante bombas de gas o compresores. Para la elección de la tecnología se deben tener en cuenta los requisitos específicos del sitio como ser la presión requerida para el transporte de gas y la presión de entrada al sistema de recuperación utilizado.

2.5.1.2 Sistemas de recuperación

El gas captado puede ser utilizado como combustible para generar energía. En países donde el precio de la energía no hace viable su generación, se realiza la quema del gas.

La quema en antorcha tiene por objetivo reducir las emisiones de metano a la atmósfera, contribuyendo globalmente a la reducción de gases de efecto invernadero y localmente a la mejora de la calidad del aire y seguridad. Se produce la quema del metano y los oligogases en presencia de oxígeno, produciéndose dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno y otros gases relacionados.



Figura 8.- Antorcha Felipe Cardoso



Figura 9.- Antorcha Las Rosas

El biogás está compuesto en un 50% de metano aproximadamente, conteniendo la mitad de la energía del gas natural, lo cual hace que sea una atractiva fuente de energía.

Hay varios métodos de uso del biogás con fines energéticos, el más común es su utilización como combustible en una unidad motor-generador para producir electricidad.

En instalaciones de hasta 1,2 MW, la generación eléctrica suele realizarse con motores de combustión interna. En plantas de tamaño pequeño, con una producción de entre 30kW y 300 kW de potencia, se utilizan micro-turbinas de gas.

Otros métodos utilizan el calor y la energía; denominados Combined heat and power (CHP).En ellos además de generar energía eléctrica se genera energía térmica útil, a partir de una única fuente de combustible. Son especialmente útiles en casos de industrias con grandes y continuos requerimientos de vapor en su proceso, que justifiquen el uso de esta tecnología.

También es posible realizar una utilización directa del biogás, mejorando su calidad a la de gas natural, como combustible de vehículos y para la evaporación de lixiviados, entre otros.

El biogás o gas de vertedero también contiene una variedad de contaminantes. Un contaminante clave en el biogás es una clase de compuestos llamados siloxanos, un subgrupo de siliconas. Estos compuestos son ampliamente utilizados en distintos procesos industriales y también son comúnmente añadidos a productos de consumo, incluyendo detergentes, shampoo, cosméticos, papel y textiles. Los siloxanos no se descomponen en el SDF ni en las instalaciones de tratamiento de efluentes. Sometidos al calor de la combustión en un motor de combustión interna o una micro-turbina, los siloxanos dejan tras de sí depósitos de sílice en los pistones, generando daños por abrasión y reduciendo la vida útil y eficiencia del motor.

Otro de los contaminantes que puede estar presente en el biogás es el ácido sulfhídrico (H_2S); en estos casos la temperatura a lo largo del circuito de ejes debe controlarse cuidadosamente para evitar problemas de corrosión. Alternativamente se puede depurar el gas con el fin de separar el H_2S antes de la quema, lo cual implicará mayores costos de inversión.

En casos donde el ácido sulfhídrico y/o siloxanos se encuentren por encima de las concentraciones aceptables para los motores de combustión interna y micro-turbinas, el gas necesita ser tratado para su uso.

Motor de Combustión Interna (MCI)

Los motores de combustión interna son una tecnología bien establecida y ampliamente utilizada a nivel mundial.

Esta tecnología ha mejorado considerablemente en las últimas décadas, impulsada por presiones económicas y ambientales, logrando un aumento en el rendimiento del combustible y reducción de las emisiones.

Los dos principales diseños de los MCI para la generación de energía son el motor de ciclo Otto de encendido por chispa y el motor de ciclo Diesel, de encendido por compresión.

Ambos utilizan una cámara de combustión cilíndrica dotada de un pistón que se conecta mediante una biela a un cigüeñal que transforma el movimiento lineal del pistón en el movimiento giratorio del cigüeñal. La principal diferencia entre las dos tecnologías, es el método de encendido del combustible: en el caso del ciclo Otto se utiliza una chispa para encender una mezcla de combustible y aire introducido en el cilindro, mientras que en los de ciclo Diesel se comprime el aire introducido en el cilindro aumentando su presión y elevando su temperatura hasta la temperatura de auto-ignición del combustible que se inyecta a alta presión.

En este caso, como el combustible será el biogás generado en el relleno se utilizará el motor de ciclo Otto, encendido por chispa. Para completar un ciclo de potencia se realizan cuatro carreras del pistón dentro del cilindro:

1. Carrera de admisión: introducción de la mezcla de aire-combustible.
2. Carrera de compresión: compresión de la mezcla de aire-combustible dentro del cilindro hasta el punto muerto superior, y una vez en ese punto se enciende por una fuente de ignición y prácticamente a volumen constante se da la combustión.
3. Carrera de potencia: se acelera el pistón como consecuencia de la expansión producto del calor debida a la combustión a alta presión de los gases.
4. Carrera de escape: expulsión de los productos de combustión a la atmósfera.

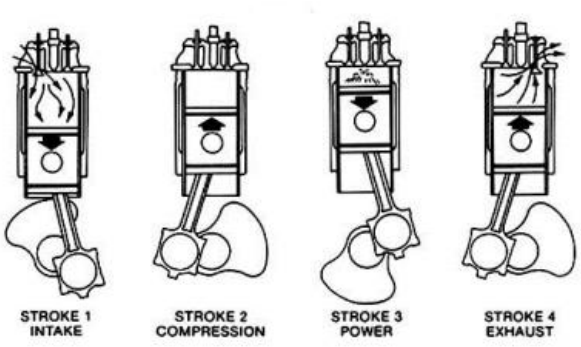


Figura 10.- Carreras del pistón

Dentro de sus ventajas se destaca la alta disponibilidad de este tipo de equipos y la confiabilidad de los mismos. Por otro lado, se tienen mayores costos de operación y mantenimiento, así como también mayores emisiones de NO_x(óxidos de nitrógeno) y CO (monóxido de carbono).

La mayoría de los fabricantes de motores asignan tres categorías de utilización de los motores según las condiciones de operación:

- Central de respaldo: diseñada para operación de duraciones cortas – valoración de potencia máxima.
- Central de pico: se utiliza para completar cargas con el fin de eliminar picos o valles, diseñada para funcionar continuamente durante tiempo ilimitado, pero con variaciones regulares de carga que no pueden superar el 75 – 85 % de la carga en el día.
- Central de base: diseñada para un funcionamiento con esa carga continua por tiempo ilimitado.

En este caso el objetivo es producir constantemente y entregarla a la red, por lo tanto la potencia de operación será la COP.

Motor de combustión interna	
Capacidad (kW)	100 - 10000
Rendimiento	25 % - 45%

Tabla 9.-Motor de combustión interna

Micro-turbinas

Las micro-turbinas de gas son pequeñas turbinas de combustión que queman combustibles líquidos o gaseosos, en este caso biogás, para impulsar un generador eléctrico.

Operan en el mismo ciclo termodinámico (Ciclo Brayton) que las turbinas de gas más grandes y comparten muchos de sus componentes básicos. En este ciclo, el aire atmosférico se comprime por medio de un compresor, a continuación se calienta mediante la entrada y quema de

combustible y luego estos gases calientes accionan una turbina, que convierte la energía térmica en energía mecánica.

En muchos casos, con el fin de aumentar el rendimiento, las micro-turbinas recuperan una parte del calor liberado para aumentar la energía de los gases que entran en la turbina.

Sus principales ventajas son las bajas emisiones y su pequeño tamaño. Por otro lado, su instalación implica un alto costo de inversión y tiene un rendimiento menor en comparación a las tecnologías mencionadas anteriormente.

Micro-turbinas	
Capacidad (kW)	30 - 330
Rendimiento	20% - 35%

Tabla 10.- Micro-turbinas

Ciclo Combinado

El ciclo combinado se basa en el acoplamiento de dos ciclos diferentes de producción de energía, uno de turbina de vapor y otro de turbina de gas. De esta forma se logra un rendimiento superior a la del gas operado separadamente.

Como principales ventajas se destaca su resistencia a la corrosión, su pequeño tamaño, bajas emisiones de NOx y sus bajos costos de operación y mantenimiento.

Ciclo combinado	
Capacidad (kW)	1000 - 6000
Rendimiento	25 % - 50 %

Tabla 11.- Ciclo combinado

2.5.2 Costos de inversión y operación y mantenimiento

Sistema de extracción del biogás

A continuación se presentan los costos de inversión del sistema de extracción, según [14].

Está compuesto por los sistemas de recolección y de succión. Para el sistema de recolección, los costos de las chimeneas verticales y horizontales son similares. Considerando un radio de influencia de 50 m, se estiman entre cuatro y seis pozos por hectárea.

El costo de inversión del sistema de recolección se encuentra entre US$ 30.000 y 50.000 por hectárea incluido encamisado, grava, cabezal y cañería.

Respecto al sistema de succión, los costos de inversión para un soplador, sistema de regulación manual, limpieza normal de gas, y el sistema de medición y control se sitúan entre 75 - 200 US$ por caudal máximo de biogás (m^3/h).

También se prevé una antorcha que funcione en los casos que la generación de energía esté fuera de servicio por mantenimiento etc. y que continúe funcionando luego de cumplido el período previsto de funcionamiento de la planta de energía. Los costos de inversión para la antorcha están entre 40 - 80 US$ por caudal máximo de biogás (m^3/h)

En la inversión también se deben incluir los costos asociados a las obras civiles, conexión a la red, etc. Se estima un costo aproximado de 36 US$/kW de potencia instalada.

Equipo para la generación de energía:

Para los costos de los equipos se consideraron dos bibliografías diferentes como referencia: "Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization" [14] y "Catalog of CHP Technologies" [15].

- **Motor de Combustión Interna (MCI)**

El costo del motor de combustión interna a gas con generador integrado e instalado en un contenedor, se encuentra entre los 1.100 - 1.700 US$/kW, [14].

Para tecnologías combinadas CHP los costos de los motores de combustión interna varían entre: 900 -1.900 US$/kW, [15].

- **Micro-turbinas**

El costo de inversión para las micro-turbinas, se encuentra entre los 3.000 - 5.000 US$/kW, [14].

Para tecnologías combinadas CHP los costos varían entre 2.700 y 1.800 US$/Kw,[15].

Los costos anuales de operación y mantenimiento de una planta de biogás con la extracción y un motor de combustión interna o micro-turbina, según [14], se encuentran entre 10 - 12 % de los costos de inversión.

2.6 Generación de energía a partir del biogás en un RSa en funcionamiento a distintas escalas.

La instalación de una planta de generación de energía en un RSa puede ser analizada desde dos concepciones diferentes, por un lado mediante una inversión pública por parte de los gobiernos departamentales y por otro, mediante inversores privados.

En cualquiera de los casos, un paso clave para el desarrollo de proyectos de generación de energía a partir del biogás es la evaluación económica del mismo, ya que la planta será construida

solamente si es rentable para el inversor, a menos que existan otras razones que motiven la realización de dicha inversión.

Por lo tanto, con el objetivo de analizar la factibilidad económica de instalar y operar una planta de generación de energía a partir del biogás producido en un RSa en funcionamiento, se plantearon seis casos de estudio en función de la población servida por cada SDF. Las poblaciones seleccionadas para cada caso de estudio son: 10.000, 50.000, 80.000, 100.000, 120.00 y 150.000 habitantes.

Serán considerados los costos asociados a la instalación de la planta (sistema de recuperación de biogás, sistema de generación de energía, antorcha, conexión a la red, entre otros), y los costos de operación y mantenimiento de equipos. No se tendrán en cuenta los costos relacionados con la instalación del relleno y su operación, ya que se asume que el RSa ya existe y se encuentra en funcionamiento.

2.6.1 Generación de energía

Para estimar la generación de energía en cada uno de los casos de estudio se debe determinar, en primera instancia, la cantidad de biogás producido en función de los residuos depositados.

2.6.1.1 Producción de biogás

Para calcular la producción de biogás de cada uno de los RSa en estudio, se utilizó la ecuación general de primer orden, para dos tipos de componentes de la fracción orgánica: rápida y lentamente degradables con un coeficiente de corrección de 0,56, según lo desarrollado en la Sección Elección y corrección de modelo2.4

A partir de la ecuación anterior se determina para cada año la cantidad de metano producido por los residuos depositados, suponiendo que el relleno tiene una vida útil de 20 años y luego es clausurado. Luego se determinó el volumen de biogás producido, asumiendo que el biogás está compuesto en promedio en un 50 % de metano.

En la Tabla 12 se presentan algunos valores de generación biogás obtenidos para cada caso de estudio.

Población	Promedio (m^3/año)	Máximo (m^3/año)	Total durante 40 años (m^3)
10.000	2,69E+04	1,48E+05	3,16E+06
50.000	1,40E+05	7,73E+05	1,64E+07
80.000	2,45E+05	1,39E+06	2,88E+07
100.000	3,17E+05	1,81E+06	3,72E+07
120.000	3,95E+05	2,27E+06	4,64E+07
150.000	5,39E+05	3,20E+06	6,32E+07

Tabla 12.- Producción de biogás para diferentes escalas de población

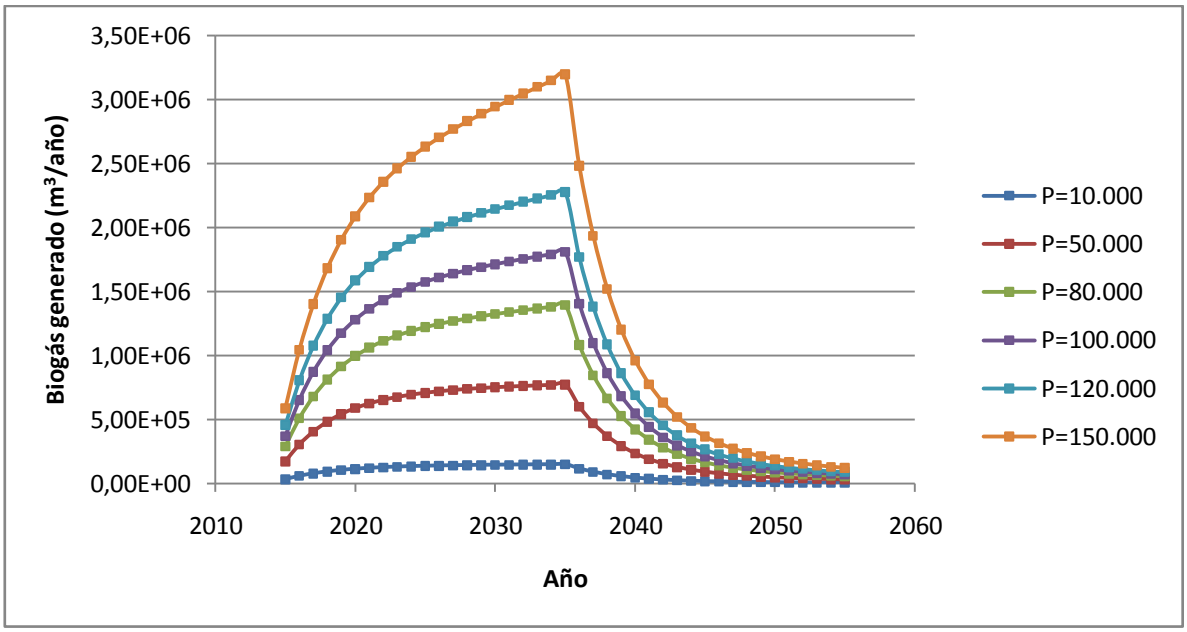


Gráfico 8.- Producción biogás

Luego se define la producción de biogás efectivamente captada en función del rendimiento del sistema de recuperación de biogás. Éste depende de varios factores como la distancia entre pozos de captación, presión de succión, impermeabilidad de la tapada final, entre otros. Según Willumsen y Terraza (2009) varía entre un 50 % y un 90 %. Para el análisis se consideró un rendimiento de recuperación del biogás del 70 %, que a su vez es el rendimiento determinado en el relleno de Las Rosas.

2.6.1.2 Energía generada a partir del biogás

Cada una de las tecnológicas mencionadas anteriormente presenta determinado rango de potencia de funcionamiento y rendimiento para la generación de energía. En la Tabla 13, se presentan las características tomadas para cada motor.

Equipo	Vida Útil (años)	Rendimiento	Capacidad (kW)
Motor de combustión interna	15 - 20	40%	100-2000
Ciclo combinado	15 - 20	55%	100-10000
Micro-turbinas	15 - 20	30%	30-330

Tabla 13.- Algunas características equipos de generación eléctrica

Para calcular la energía eléctrica producida por cada motor se utiliza el PCI del biogás y el rendimiento de cada tecnología, ver sección 2.3. Memoria de Cálculo.

En la Tabla 14 se presentan los resultados de potencia máxima a instalar, y energía eléctrica anual máxima obtenida para cada caso de estudio, suponiendo una explotación mediante módulos de 1 año.

	Potencia máxima a instalar (kW)		
Población	**Motor de combustión interna**	**Ciclo combinado**	**Micro-turbinas**
10.000	18	25	14
50.000	96	132	72
80.000	173	238	130
100.000	225	309	169
120.000	283	389	212
150.000	397	547	298
	Energía eléctrica anual máxima (kWh)		
Población	**Motor de combustión interna**	**Ciclo combinado**	**Micro-turbinas**
10.000	161.879	222.584	121.409
50.000	843.189	1.159.386	632.392
80.000	1.519.072	2.088.724	1.139.304
100.000	1.971.370	2.710.634	1.478.528
120.000	2.479.430	3.409.216	1.859.572
150.000	3.481.995	4.787.742	2.611.496

Tabla 14.- Potencia y energía máxima, según tecnología empleada

Si bien el ciclo combinado permite obtener las mayores potencias, su rango de utilización corresponde a potencias sensiblemente superiores a los rangos que se manejan en este tipo de sistemas, por lo tanto se descarta esta tecnología para las escalas de generación de energía propuestas.

Analizando los resultados, el motor de combustión interna es la tecnología más apropiada para los casos de estudio con población mayor a 80.000 habitantes, ya que la potencia máxima y mínima se encuentra dentro del rango de la capacidad de estos sistemas. Sumado a esto, es una tecnología sobre la cual se tiene un amplio conocimiento a nivel del país, siendo su aplicación más confiable que para otras tecnologías más sofisticadas.

Las micro-turbinas de gas son una buena opción para los casos de menor población, 10.000 y 50.000 habitantes, ya que no se alcanzan potencias que superen los 100 kW como para justificar la inversión en motores de combustión interna pero se tiene como desventaja un menor rendimiento en comparación con las otras tecnologías.

En la Tabla 15, se muestra la cantidad de energía eléctrica producida durante 40 años de funcionamiento para cada caso de estudio en función de la tecnológica seleccionada.

	Total Energía Eléctrica durante 40 años de funcionamiento (kWh)	
Población	**Motor de Combustión Interna**	**Micro-turbina**
10.000		2.594.764
50.000		13.506.939
80.000	31.480.70	
100.000	40.676.601	
120.000	50.749.725	
150.000	69.168.611	

Tabla 15.- Total energía durante 40 años de funcionamiento

A modo representativo se determinó la cantidad máxima de viviendas que podría alimentar cada caso de estudio en el año de máxima producción de energía, en función del consumo promedio nacional por vivienda.

Consumo de energía eléctrica promedio nacional por vivienda (kWh/año)	2640[2]

Población	**Máxima Energía (kWh/año)**	**Cantidad máxima de viviendas abastecidas**
10.000	121.409	46
50.000	632.392	240
80.000	1.519.072	575
100.000	1.971.370	747
120.000	2.479.430	939
150.000	3.481.995	1.319

Tabla 16.- Viviendas abastecidas

2.6.2 Costos de inversión y operación y mantenimiento

Teniendo en cuenta los costos de referencia presentados en la Sección 2.5.2, para el análisis se consideraron los siguientes costos para los diferentes componentes del sistema:

- Sistema de recolección: 40.000 US$/há
- Sistema de bombeo: 138 US$/$m^3$/h biogás
- Antorcha: 60 US$/$m^3$/h biogás
- Conexión a la red: 36 US$/kW

En el caso de los equipos de MCI y micro-turbinas, los costos de inversión fueron seleccionados a partir de los diferentes costos de referencia y las capacidades requeridas, para las diferentes escalas, en función de la potencia máxima calculada. En particular, para los MCI se consultaron los precios del mercado regional con el Ing. Oscar Ferreño, que cuenta con amplia experiencia en el área.

[2] Fuente: Consumo de Servicios de Energía y Agua en la población uruguaya, Instituto de Economía. Agosto 2011

Los costos seleccionados para el análisis fueron los siguientes:

- Motor de Combustión Interna: 1.100 US$/kW
- Micro-turbina: 2.500 US$/kW

Respecto a los costos de operación y mantenimiento, se tomó como valor el 11 % de la inversión anual.

2.6.3 Análisis financiero

2.6.3.1 VAN y TIR

En función de los egresos por inversión y operación y mantenimiento de la planta de generación de energía y los ingresos por venta de la misma se realiza un análisis financiero para cada caso de estudio. Se determinará la viabilidad financiera del proyecto evaluando de los indicadores de rentabilidad, Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Actual Neto (VAN) aplicados sobre un flujo de fondos.

El flujo de fondo es un estado financiero dinámico que se realiza a partir de la acumulación neta de activos líquidos en un determinado período, por lo tanto éste es un indicador importante de la liquidez de un proyecto. El estado de dicho flujo de caja brinda información relevante sobre los ingresos y egresos de un proyecto en el período de tiempo considerado.

Por otro lado, el VAN permite calcular el valor presente de determinado flujo de caja futuro, originados por una inversión. Es decir, mide en términos de dinero al día de hoy, lo que dejará el proyecto una vez descontados los costos (incluyendo la inversión). En consecuencia, para que el proyecto sea aceptado el VAN debe ser mayor a cero.

El VAN se basa en el concepto del valor tiempo del dinero, es decir, no es lo mismo tener determinada suma de dinero el día de hoy que esa misma cifra en cierto momento futuro. El dinero al día de hoy corresponde a una cantidad mayor en el futuro, para determinar dicho valor futuro es necesario considerar una Tasa de Descuento (TD) de los fondos liberados anualmente por el proyecto. Con el criterio de la TIR se determina la tasa de descuento que produce un VAN = 0. La TIR es la tasa máxima a la que se puede remunerar el capital utilizado para financiar el proyecto sin que la operación se vuelva deficitaria; en otras palabras representa la rentabilidad que proporciona el proyecto.

La TD es una medida financiera que se aplica para determinar el valor actual de un pago futuro. Es una tasa relativamente subjetiva ya que depende en gran medida de los criterios que considere apropiados quien evalúe la inversión como ser el costo de oportunidad de su dinero, su grado de aversión al riesgo que perciba en el proyecto, la proporción de la inversión que estime conveniente financiar a través de terceros y el costo de dicho endeudamiento. Asimismo, la ausencia en el Uruguay de un mercado de capitales desarrollado dificulta la aplicación de modelos para su determinación.

Conforme a lo anterior se optará por realizar el análisis con una TD del 10 %.

2.6.3.2 Inflación

Otro factor de gran incidencia en el análisis de viabilidad es la inflación de los precios a lo largo de los años. El concepto de inflación refiere al aumento generalizado y sostenido de los precios de los bienes y servicios existentes en el mercado durante un período de tiempo, generalmente un año. Sin embargo, los diferentes componentes del análisis financiero presentan distintas tasas de inflación las cuales son difíciles de predecir, por ejemplo, el precio de venta de la energía se fija a través de una paramétrica que tiene en cuenta diversas variables dentro de las cuales una de ellas es la inflación y por lo tanto no se comportará de forma lineal.

Debido a esto, se optó por realizar el análisis a precios constantes y en dólares americanos, sin tener en cuenta los efectos de la inflación de bienes y servicios, ni la devaluación propia de la moneda local.

2.6.3.3 Financiación con capitales propios o mixtos

A su vez, el proyecto podrá ser financiado mediante capitales propios o mixtos. En el caso de capitales mixtos, se evaluará el proyecto considerando que una parte de la inversión inicial, es financiada con un préstamo bancario y la parte restante con capitales propios. El préstamo entregado por el banco depende principalmente de la confianza o respaldo que tenga el cliente y el monto que se pide.

En este caso, basándonos en recomendaciones del Ing. Hector Pastori (Especializado en Formulación y Evaluación de Proyectos de inversión), se consideró que el préstamo otorgado por el banco cubre un 70 % de la inversión inicial y será pagado a 10 años.

La cuota del banco tiene dos componentes internos: intereses y amortización del crédito. La amortización del crédito es básicamente devolver el dinero que fue prestado, mientras que los intereses se aplican sobre el saldo impago, es decir sobre lo que se le debe al banco y se pagan anualmente. La tasa de interés pasiva fue tomada de la página de la INE[3] en base al promedio anual en moneda nacional para el año 2013, ya que éste era el último año del cual se encontró información disponible allí, obteniéndose una tasa de interés pasivo: t_p = 7 %

Por último, la cuota anual a pagar se define en función de la tasa de interés pasiva y los 10 años de pago.

2.6.3.4 Impuesto a la Renta de las Actividades Económicas

Como se mencionó anteriormente, la factibilidad financiera puede ser analizada desde dos puntos de vista, como si fuera desarrollada mediante una inversión pública por parte de los gobiernos

[3]Página web: http://www.ine.gub.uy/web/guest/moneda-y-banca

departamentales y por otro, mediante inversores privados. Básicamente, la diferencia en el análisis de estas dos situaciones son las deducciones impositivas de IRAE (Impuesto a la Renta de Actividades Económicas) que deben ser consideradas en el caso de que el proyecto se desarrolle a través de inversores privados.

Dicho impuesto se calculó como el 25% sobre las utilidades (ganancias menos costos), dentro de las utilidades no se consideran la inversión ni la amortización del préstamo.

Por otro lado, dado que el proyecto en análisis presenta un gran interés para el país es posible obtener beneficios como la exoneración o descuentos en dichos impuestos. La ley de inversiones (Ley N° 16.906) fue creada para incentivar la inversión en el Uruguay, a través de la exoneración de impuestos. Estos beneficios son otorgados por la Comisión de aplicación de la ley de inversiones (COMAP) que dispone de métodos para la evaluación de los proyectos a través de la asignación de puntos de acuerdo a distintos criterios.

Utilizando un simulador de la Unidad de Apoyo al Sector Privado (que se encuentra en la web del Ministerio de Economía y Finanzas) e ingresando los datos del proyecto, se obtuvo un puntaje de 5 puntos que se traducen en una exoneración del impuesto del 56 % sobre la inversión, a descontar en 10 años. La mayor cantidad de puntos se obtuvieron en los criterios: utilización de tecnologías limpias o incremento de investigación y desarrollo e innovación, descentralización y manufacturas de tecnología alta.

El pago mínimo anual de IRAE es del 40 % del impuesto, pudiendo exonerar el restante 60 % durante un plazo de 10 años y hasta descontar la exoneración otorgada (56 % de la inversión). Por otro lado, una vez finalizado el plazo de exoneración, el proyecto puede ser presentado nuevamente ante la COMAP con el fin de que se le otorgue una nueva exoneración.

2.6.3.5 Venta de energía

El precio de venta de la energía depende en gran medida de la fuente de la que provenga, siendo la biomasa la mejor paga. Los precios estimados[4] de venta de energía en función de las fuentes, al 2014, fueron los siguientes:

- Eólica: 61,2 US$/kWh
- Fotovoltaica: 91,5 US$/kWh
- Biomasa: 112,0 US$/kWh

Se observa un aumento considerable en el precio de venta de la biomasa respecto al precio publicado en 2011 en el Pliego Particular de Biomasa[5], donde el precio de venta de energía eléctrica era de 92 US$/MWh.

[4] Fuente: PROBIO: Producción de electricidad a partir de biomasa, Diciembre 2014

Teniendo en cuenta los datos anteriores, se optó por establecer un precio límite máximo de venta de 125 US$/MWh, siendo este el limite planteado para determinar si los proyectos analizados son económicamente factible o no.

2.6.3.6 Casos de evaluación

A partir de todo lo expuesto anteriormente, se evaluarán los diferentes escenarios propuestos para dos casos:

- Financiación propia, sin IRAE: Representando el caso que el proyecto sea desarrollado por las intendencias departamentales.
- Financiación mixta, con IRAE: Representando el caso que el proyecto sea desarrollado por inversores privados.

2.6.4 Escenarios analizados

Se analizaron diferentes escenarios respecto a los años de funcionamiento de la planta de energía y la forma de explotación del RSa.

Debido a que la captación del biogás se puede comenzar una vez que el módulo fue clausurado, el número de años de actividad de cada módulo es una variable de gran importancia en el análisis de la generación de energía. Por lo tanto, el aprovechamiento del biogás dependerá de la forma en que se realice la explotación del relleno.

Por un lado, realizando módulos de 1 año se logra optimizar la captación del biogás y en consecuencia aumentar la utilización del recuso con fines energéticos. Sin embargo, existen otros factores que influyen en la decisión, como ser los costos de inversión del RSa, ya que ésta alternativa implica la construcción de nuevos módulos anualmente y por lo tanto una constante inversión a lo largo de los años. A su vez, requiere un plan estratégico de mayor complejidad en lo que refiere al diseño general del RSa (utilización de áreas, conducciones de lixiviado y biogás entre otras) y su operación y mantenimiento (teniendo en cuenta que se estará en obra constantemente)

Conforme a lo anterior, se optó por analizar las alternativas de explotación mediante módulos de 1 y 5 años.

Inicialmente, para el escenario de módulos de 1 año, se asumió un funcionamiento de la planta de energía eléctrica de 40 años, es decir que luego de clausurado el relleno se continuaba recuperando el biogás y generando energía 20 años más. La principal observación a destacar de este escenario inicial fue que, para el precio de venta propuesto (125US$/MWh) en todos los

[5] Pliego de bases de condiciones para la convocatoria a interesados en la celebración de contratos de compra venta de potencia y energía eléctrica en el marco del Decreto del Poder Ejecutivo N° 367/010. Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE).

casos el flujo de caja de los últimos 14 años de operación de la planta dio deficitario, es decir que los ingresos por venta de energía no cubrían los costos de operación y mantenimiento.
Este resultado es coherente con el hecho que en la composición de residuos dispuestos predomina la fracción rápidamente degradable (56%) frente a la lentamente degradable (9 %) y por lo tanto la producción de biogás disminuye considerablemente pasados los 6 años aproximadamente luego de clausurado el relleno.
Debido a esto, se realizó el análisis de los escenarios de módulos de 1 y 5 años considerando 25 y 21 años respectivamente de funcionamiento de la planta de energía, es decir, 6 años luego de la clausura.

2.6.4.1 Módulos de 1 año

En este caso se construyen módulos de un año de vida útil, por lo tanto se capta el biogás a partir del segundo año de funcionamiento del relleno. El biogás generado por la degradación de los residuos en el año que los módulos están en actividad no se captará, en el Gráfico 9 se muestra la curva del biogás potencialmente captado y el total generado, para el caso de 150.000 habitantes.

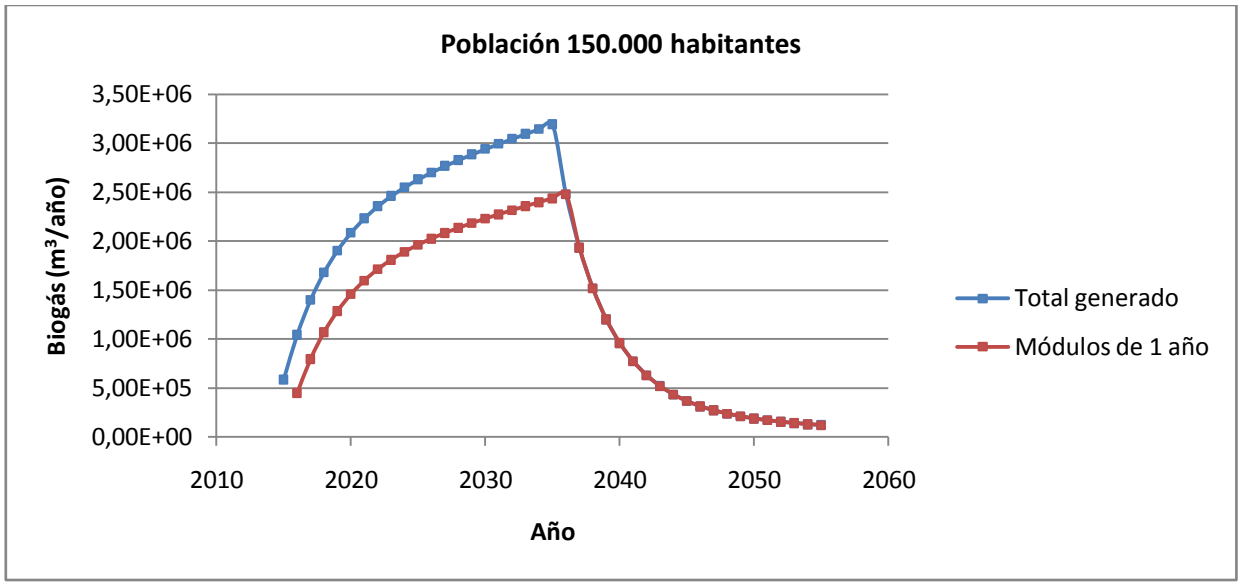


Gráfico 9.- Biogás captado, módulos 1 año

El porcentaje de biogás perdido en relación al total generado es un 20 % para todas las escalas, en la Tabla 22 se presentan los valores:

	Biogás (m3)		
Población	Total	Captado	% perdida
10.000	2,94E+06	2,24E+06	24%
50.000	1,53E+07	1,17E+07	24%
80.000	2,67E+07	2,04E+07	24%
100.000	3,46E+07	2,63E+07	24%
120.000	4,31E+07	3,28E+07	24%
150.000	5,86E+07	4,46E+07	24%

Tabla 17.- Pérdida de biogás, módulos 1 año

A modo de simplificación se consideraron módulos de geometría rectangular vista en corte, en la realidad deberían tener una forma de tronco pirámide con una determinada pendiente (en general 3H:1V) para evitar el deslizamiento de los residuos.
Las alturas útiles totales de los módulos consideradas para cada una de las escalas fueron las siguientes:

Población	10.000	50.000	80.000	100.000	120.000	150.000
Altura útil (m)	4	5	6	7	9	10

Tabla 18.- Altura útil de los módulos 1 año para cada escala

Para cada caso de estudio se determinaron las capacidades de los equipos y las etapas de funcionamiento, de manera tal que no se supere la vida útil de los motores, se maximice la utilización de los mismos y se minimicen los costos de inversión. Los cálculos realizados se presentan en la sección 2.4.2 de la Memoria de Cálculo.
En todos los casos se tomaron dos etapas de duración 13 años. Las capacidades y utilización de los motores fueron las siguientes:

	Etapa	Duración (años)	Equipo	Motor (kW)	Utilización
P=10.000	1	12	Micro-turbina	30	30%
	2	13		30	39%
P=50.000	1	12	Micro-turbina	70	72%
	2	13		80	77%
P=80.000	1	13	Combustión interna	160	72%
	2	13		180	81%
P=100.000	1	12	Combustión interna	200	74%
	2	13		230	82%
P=120.000	1	12	Combustión interna	250	73%
	2	13		290	81%
P=150.000	1	12	Combustión interna	340	71%
	2	13		400	82%

Tabla 19.- Capacidad y utilización motores, módulos 1 año

Se observa que en el caso de 10.000 habitantes se dan valores de utilización muy bajos, esto se debe a que la potencia generada se encuentra siempre por debajo de la capacidad mínima de la tecnología seleccionada (micro-turbinas).

En la Tabla 20 se resumen los resultados de el VAN y TIR, obtenidos con el precio de venta de 125 US$/MWh, así como también el precio medio de venta a lo largo del período para el cual se obtiene una VAN=0, para el caso con financiación propia sin considerar el impuesto IRAE

	Población	VAN (US$)	TIR	Precio medio venta energía en US$ (VAN=0)
Micro-turbina	10.000	-195.264	-	379
	50.000	-346.101	-	211
Motor de Combustión Interna	80.000	122.278	15%	112
	100.000	257.642	18%	103
	120.000	451.308	20%	94
	150.000	645.516	21%	92

Tabla 20.- Resumen análisis financiero- Financiación propia sin IRAE, módulos 1 año

En la Tabla 22se resumen los resultados para el caso con financiación mixta considerando el impuesto IRAE:

	Población	VAN (US$)	TIR	Precio medio venta energía en US$ (VAN=0)
Micro-turbina	10.000	-188.052	-	387
	50.000	-344.338	-	217
Motor de Combustión Interna	80.000	85.679	16 %	115
	100.000	204.330	21 %	106
	120.000	377.723	25 %	97
	150.000	544.838	25 %	94

Tabla 21.- Resumen análisis financiero- Financiación mixta con IRAE, módulos 1 año

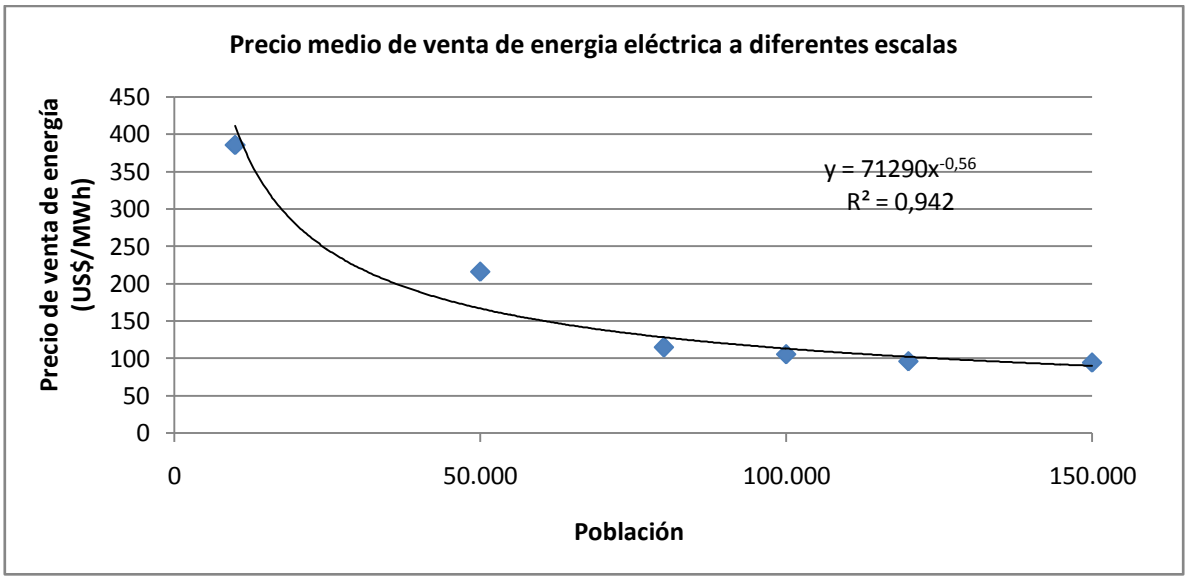


Gráfico 10.- Precio medio de venta energía eléctrica (VAN=0), financiación mixta con IRAE, módulos 1 año

Se concluye entonces que, explotando el relleno con módulos de 1 año, es económicamente viable generar energía para las escalas mayores a 80.000 habitantes para el precio de venta propuesto en el análisis.

En el Gráfico 10 se puede observar la disminución del precio de la venta de energía en función de la población servida por el relleno sanitario. Es claro que a medida que aumenta la población la viabilidad económica del emprendimiento crece también. En particular, el precio de la venta de energía decrece según una ley potencial a medida que se incrementa la población.

Módulos de 5 años

En este escenario los módulos tienen una vida útil de 5 años, por lo tanto en total son 4 módulos, y se comienza a captar el biogás a partir del sexto año de funcionamiento, es decir, luego de cerrado el primer módulo y así sucesivamente con los restantes.
El biogás generado por la degradación de los residuos en los años que los módulos están en actividad no se capta, disminuyendo el aprovechamiento del mismo, en el Gráfico 11 se muestra la curva del biogás potencialmente captado y el total generado, para el caso de 150.000 habitantes.

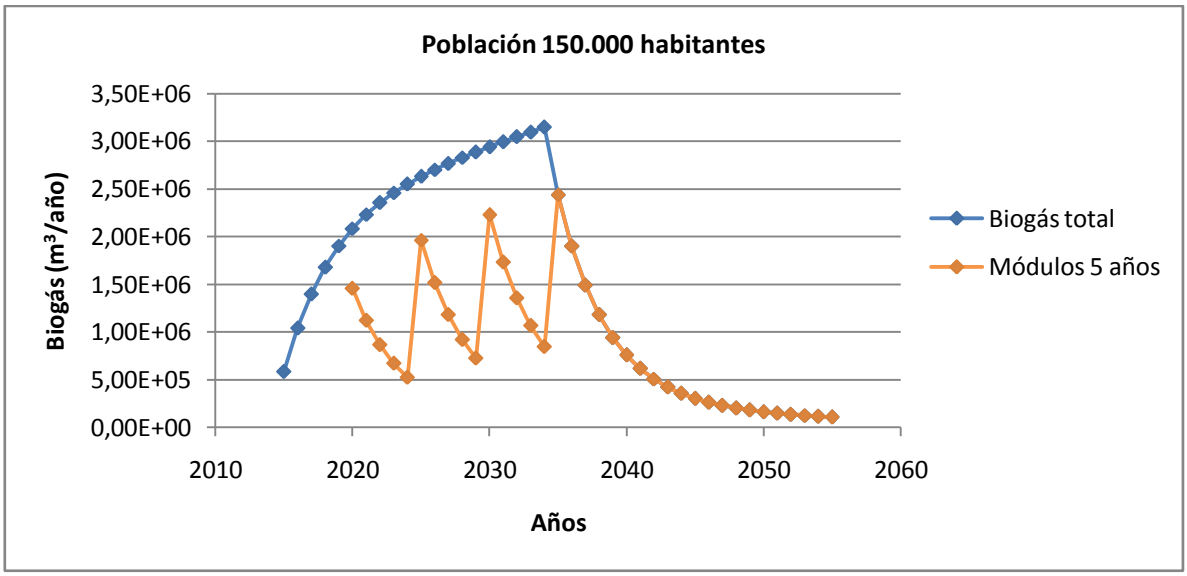


Gráfico 11.- Biogás generado y potencialmente captado, módulos 5 años

Se analizaron las escalas mayores a 80.000 habitantes ya que en el caso anterior se observó que escalas menores, las cuales requieren utilización de tecnologías como las microturbinas, no son económicamente viables y por lo tanto tampoco lo serán en este caso que es aún más desfavorable.

El porcentaje de biogás perdido en relación al total generado es un 52% para todas las escalas, en la Tabla 22 se presentan los valores:

	Biogás (m^3)		
Población	Total	Captado	% pérdida
80.000	2,56E+07	1,23E+07	52,1%
100.000	3,31E+07	1,59E+07	52,1%
120.000	4,13E+07	1,98E+07	52,1%
150.000	5,61E+07	2,69E+07	52,0%

Tabla 22.- Pérdida de biogás, módulos 5 años

Se consideró como hipótesis a los efectos de simplificar los cálculos, que cada módulo está compuesto por 5 niveles y que cada nivel se llena en un año. Al igual que para los módulos de 1 año se consideró una geometría rectangular vista en corte.

Las alturas útiles totales de los módulos consideradas para cada una de las escalas fueron las siguientes:

Población	80.000	100.000	120.000	150.000
Alturas útiles (m)	8	10	12	14

Tabla 23.- Alturas de los módulos 5 años para cada escala

Razonando análogamente a la parte anterior, se definen las capacidades de los equipos, en este caso para dos etapas de 10 y 11 años de funcionamiento.

	Etapa	Duración (años)	Equipo	Motor (kW)	Utilización
P=80.000	1	10	Combustión interna	150	55%
	2	11		180	58%
P=100.000	1	10	Combustión interna	200	53%
	2	11		230	58%
P=120.000	1	10	Combustión interna	240	55%
	2	11		280	60%
P=150.000	1	10	Combustión interna	320	55%
	2	11		400	58%

Tabla 24.- Capacidades y utilización motores, módulos 5 años

Los resultados obtenidos del análisis para el caso con financiación propia sin considerar el impuesto IRAE, fueron los siguientes:

	Población	VAN (US$)	TIR	Precio medio venta energía en US$ (VAN=0)
Motor de Combustión Interna	80.000	-65.055	-	139
	100.000	-17.896	8%	128
	120.000	50.454	13%	118
	150.000	110.355	15%	114

Tabla 25.- Resultados análisis financiero- Financiación propia sin IRAE, módulos 5 años

Para el caso de financiación mixta considerando el impuesto IRAE, se obtuvieron los siguientes resultados:

	Población	VAN (US$)	TIR	Precio medio venta energía en US$ (VAN=0)
Motor de Combustión Interna	80.000	-70.652	-	141
	100.000	-29.149	4%	130
	120.000	31.215	16%	120
	150.000	80.974	21%	116

Tabla 26.- Resultados análisis financiero-Financiación mixta con IRAE, módulos 5 años

Se concluye que, explotando el relleno con módulos de 5 años, es económicamente viable generar energía para las escalas mayores a 100.000 habitantes para el precio de venta propuesto en el análisis.

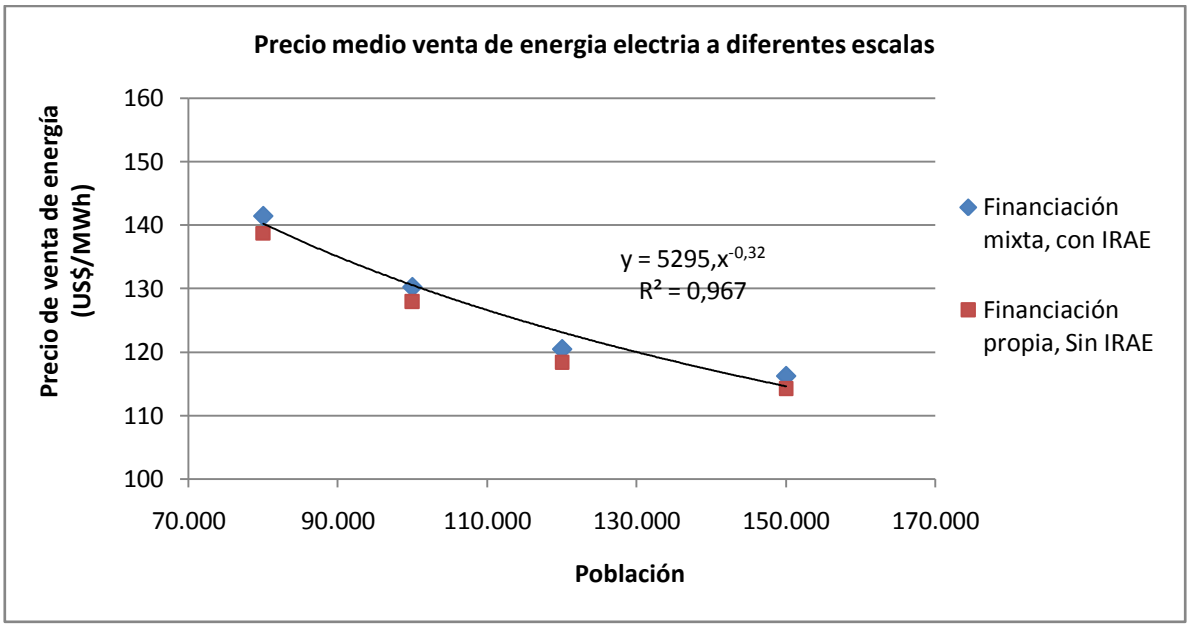


Gráfico 12.- Precio de venta de energía para VAN=0, módulos 5 años

2.6.4.2 Comparación resultados

En el Gráfico 13se presentan los resultados obtenidos para módulos de 1 y 5 años. Se observa que el precio de venta de energía mínimo para que el proyecto será rentable (VAN=0) aumenta para módulos de 5 años.

Este resultado no es del todo intuitivo porque si bien se tiene una eficiencia de captación significativamente mayor para módulos de 1 año y por ende un mayor ingreso por venta de energía, por otro lado se tienen mayores costos de inversión principalmente en los pozos de recolección de biogás los cuales se construyen todos los años para cada módulo teniendo que cubrir un área mayor que en el caso de los módulos de 5 años.

En particular se destaca que para las escalas de 80.000 y 10.000 habitantes la condición de explotación en módulos de 1 año es económicamente rentable, mientras que para módulos de 5 años no lo es, siendo la forma de explotación del RSa una variable determinante para la viabilidad del proyecto.

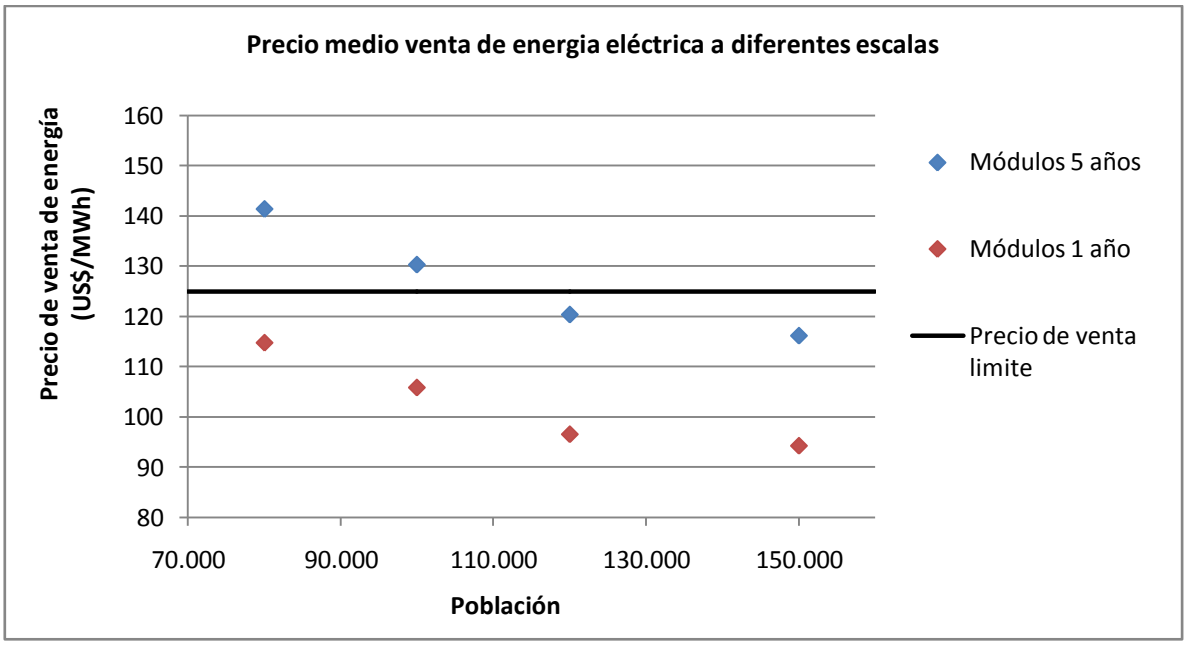


Gráfico 13.- Precio medio de venta de energía para VAN=0, financiación mixta con IRAE, módulos de 1 y 5 años

3 Análisis de opciones en Uruguay

Como se ha mencionado anteriormente, las políticas de gestión de residuos llevadas a cabo en los países más desarrollados se basan en el principio de jerarquía, priorizando los diferentes tipos de aprovechamiento y optando por la disposición final como última alternativa. Sin embargo, todo aprovechamiento del residuo original (reutilización, reciclaje, compostaje o valorización energética) generan inevitablemente rechazos que deben ser dispuestos en condiciones seguras; por lo tanto la operación ambientalmente adecuada de los RSa continua siendo una componente de gran interés en la gestión de residuos.

Particularmente en nuestro país no existen limitaciones en la disponibilidad del suelo, siendo el RSa una alternativa apropiada para disponer los residuos no valorizables. Si bien a nivel mundial las tendencias apuntan a reducir al máximo posible, la disposición final de los residuos, a nivel regional no se ha avanzado lo suficiente en materia de educación y concientización de la población y las instituciones gubernamentales, siendo esto una de las limitaciones más importantes para la aplicación de tecnologías avanzadas para el tratamiento de residuos.

Un aspecto fundamental a considerar es el avance en conocimiento y educación ambiental en cuanto a la gestión de residuos y su correcta disposición, así como también el desarrollo de tecnologías asociadas al control y gestión de los aspectos ambientales de los RSa, con el fin de minimizar los efectos adversos sobre la salud y el medio ambiente.

Actualmente, en nuestro país existen dos RSa en funcionamiento, uno ubicado en la capital Montevideo (Felipe Cardoso) y otro en el Departamento de Maldonado (Las Rosas). Ambos

cuentan con sistemas de captación del biogás generado en el RSa; en el primero únicamente se realiza la quema en antorcha para reducir las emisiones de GEI, mientras que en el segundo se aprovecha energéticamente.
A lo largo de los años la gestión de ambos rellenos se ha visto envuelta en procesos de mejora continua, obteniéndose resultados que se destacan positivamente. Las experiencias resultantes sirven como motivación a la inversión tanto de capital como de conocimiento para proyectos futuros. Además, son ejemplos clave y brindan información de base útil para continuar con el proceso de mejora.

Sin embargo, no se debe perder de vista la fuerte problemática y las carencias de los servicios de gestión de RS y RSa en el interior del país, en donde se observa que la mayoría de las localidades no poseen una correcta disposición de sus residuos.

La política energética que se ha planteado Uruguay en los últimos años, se basa en la diversificación de la matriz energética, buscando estimular las fuentes renovables no tradicionales. Por lo tanto, la opción de disponer los residuos en RSa y generar energía se presenta como oportuna ya que respeta las líneas estratégicas planteadas a nivel nacional, pudiendo acceder a financiamientos y beneficios otorgados en el marco del Plan Nacional de Eficiencia Energética.

Por los anteriores motivos, se considera que la disposición final en rellenos sanitarios con posibilidad de generación de energía eléctrica, es hoy en día la opción más conveniente para resolver los complejos problemas a los que se enfrentan varias ciudades y departamentos del país.

4 Análisis de regionalización

En el interior del país la población se distribuye en centros poblados de pequeña y mediana concentración y en general ubicados a distancias considerables entre ellos. Surge entonces la necesidad de plantear una regionalización que haga realmente viable la implantación de un RSa. Por lo tanto, se propone analizar la viabilidad de aplicar un sistema común a varias localidades de manera que, a través de un solo proyecto, se logre concentrar los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como también la cantidad de residuos necesarios para que sea viable generar energía a partir del biogás. A su vez, se logra de esta manera resolver los problemas de disposición final de los RSU de varias ciudades.

4.1 Regionalización preliminar

Con el fin de determinar potenciales regiones en el interior del país, en primera instancia se determinará la distancia máxima de transporte de residuos, para localidades con poblaciones mayores a 10.000. Se considerará como hipótesis, que el costo del transporte al relleno regional, no debe superar el costo de disposición final de los residuos.

4.1.1 Costos de transporte

Se separaron los costos de transporte en dos componentes, por un lado los costos asociados a los kilómetros recorridos por el camión que transporta los RS hacia el RSa, y por otro los costos por toneladas a trasladar.

4.1.1.1 Costos de transporte por km recorrido

Estos costos consideran el combustible, los neumáticos y lubricantes los cuales aumentan linealmente en función a los kilómetros recorridos. Los costos y rendimientos utilizados se detallan en la Memoria de Cálculo, sección 3.1.1.

Resultando un valor total de 0,8 US$/km.

4.1.1.2 Costos por tonelada transportada

Estos costos consideran la cantidad de camiones necesarios para transportar los residuos generados por localidad teniendo en cuenta la capacidad del camión y la cantidad de viajes que puede realizar el mismo. En particular el costo tenido en cuenta es el salario del chofer que conduce el camión.

Respecto a la capacidad del camión se consideraron 10 toneladas, que es la capacidad máxima de camiones de recolección que se utilizan hoy en día en Montevideo. Sin embargo, si se tiene en cuenta la posibilidad de incorporar una estación de transferencia los camiones probablemente tengan una mayor capacidad. De todas maneras, en este caso de pre-regionalización no se ahondará en dicha discusión y se supondrá que el transporte al relleno se realiza con los mismos camiones que la recolección.

El número de viajes diarios (un viaje considera ida y vuelta) se calcula en función de las toneladas diarias a transportar y la capacidad de los camiones. Ahora bien, un camión puede realizar varios viajes al día. Por lo tanto, se asumió un valor máximo de dos viajes al día por camión, es decir cuatro en total considerando ida y vuelta. Este número considera que la jornada de trabajo está compuesta por el tiempo de descanso, de transporte, de carga y descarga y tiempos muertos

Jornada de trabajo	hs	8
Tiempo de descanso	hs	1
Tiempo de carga y descarga	hs	2
Tiempo muerto	hs	1
Tiempo de transporte	hs	4

Tabla 27.- Distribución de las horas de trabajo

Teniendo en cuenta que el tiempo de transporte de cada camión es de 4 hs, suponer un viaje al día permitiría un transporte a mayores distancias, aunque implicaría un gran costo en cantidad de

camiones, y por el contrario suponer 6 viajes al día reduciría considerablemente los km que el camión puede recorrer, porque su tiempo está limitado.

Por los anteriores motivos, se optó por considerar un valor máximo de dos viajes al día, de esta manera se determina el número de camiones necesarios y el costo asociado al salario del chofer.

4.1.2 Costos por disposición final

Para seleccionar el costo por disposición final, se consultó la Evaluación Regional de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe, realizada en 2002. Para Uruguay, en este informe se diferencian los costos según dos regiones:

Región 1: Montevideo, Canelones, Colonia, Flores, Florida, Maldonado y Soriano

Región 2: Artigas, Cerro Largo, Durazno, Lavalleja, Paysandú, Rio Negro, Rivera, Rocha, Salto, San José, Tacuarembó y Treinta y Tres

	Región 1	**Región 2**
Disposición final (US$/ton)	6,8	16,5

Tabla 28.- Cotos por disposición final, Evaluación Regional de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe

Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando que la Región 2 es más representativa de la situación en el interior del País, se asumió un costo por disposición final de 16 US$/ton, que representan los costos de operación y mantenimiento del RSa.

4.1.3 Determinación de la distancia máxima

Como se mencionó anteriormente, la hipótesis a tener en cuenta para determinar la distancia máxima será, que el costo del transporte al relleno regional, no debe superar el costo de disposición final de los residuos, por lo tanto:

$$Costo\ por\ disposición\ final\ [US\$/mes] = Costos\ por\ tonelada\ transportada\ [US\$/mes] + Costo\ por\ km\ recorrido\ [US\$/mes]$$

En base a la información de tasas de generación, costos de transporte y disposición final, es posible determinar la distancia máxima a partir de la ecuación anterior. El desarrollo de cada uno de los términos se presenta en la Sección 3.1.3. de la Memoria de Calculo.

Finalmente, se corrige la distancia máxima, teniendo en cuenta que cada camión cuenta con 4 horas para el transporte y una velocidad máxima de 75 km/h.

A partir de las distancias determinadas y teniendo en cuenta las rutas que existen actualmente en el Uruguay se realizó una regionalización preliminar. Se conformaron 9 regiones a lo largo del país teniendo en cuenta únicamente las localidades con poblaciones mayores a 10.000 habitantes, por lo que algunas localidades no pudieron ser tenidas en cuenta. Se excluyó el departamento de

Canelones por encontrarse muy próximo a la ciudad de Montevideo, la cual ya cuenta con un RSa en operación, y también Maldonado ya que actualmente ya existe un RSa en operación (Las Rosas).

A continuación se presentan las 9 regiones, incluyendo las localidades que las conforman, la población correspondiente a cada localidad, la población total resultante para cada región y una imagen descriptiva.

Particularmente, la ciudad de Salto podría considerarse como una región en sí misma, ya que la población urbana determinada a partir del censo del 2011 supera los 100.000 habitantes. Debido a que la idea inicial era establecer regiones, se opto por unificar las ciudades de Salto y Paysandú en la Región 2 y de esta forma tener mayores aportes de RSU.

Región	Localidad	Habitantes	Población total
1	Rivera	64.465	123.140
	Tacuarembó	54.755	

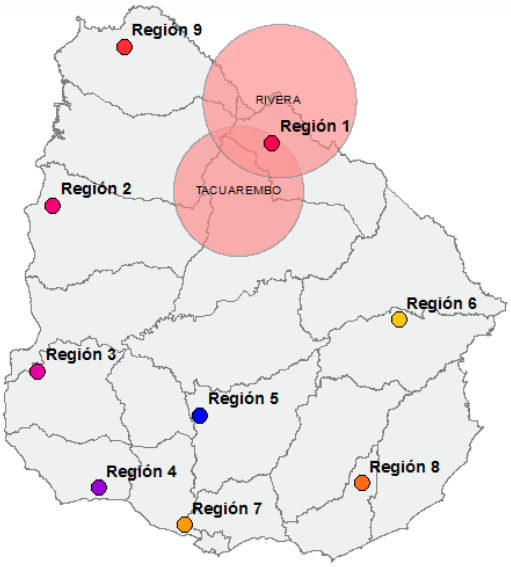


Gráfico 14.- Región 1- Rivera y Tacuarembó

Región	Localidad	Habitantes	Población total
2	Salto	104.011	180.423
	Paysandú	76.412	

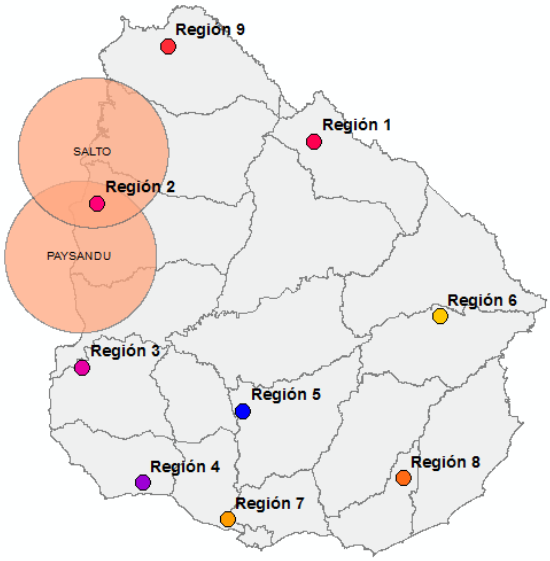


Gráfico 15.- Región 2- Salto y Paysandú

Región	Localidad	Habitantes	Población total
3	Mercedes	41.974	83.554
	Dolores	17.174	
	Fray Bentos	24.406	

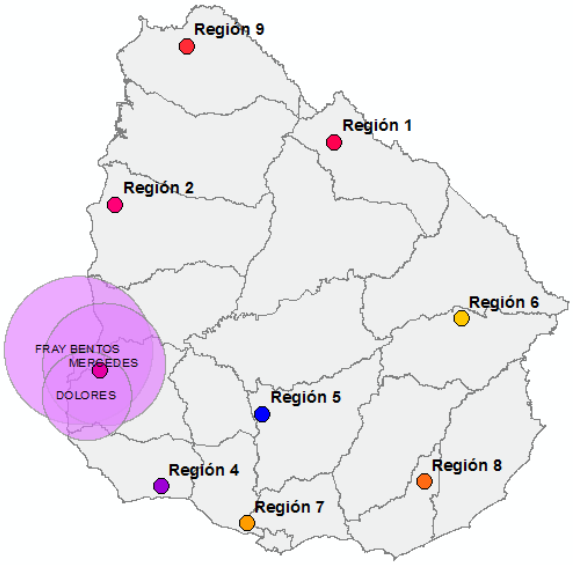


Gráfico 16.- Región 3- Mercedes, Fray Bentos y Dolores

Región	Localidad	Habitantes	Población total
4	Colonia del Sacramento	26.231	59.762
	Juan Lacaze	12.816	
	Rosario	10.085	
	Nueva Helvecia	10.630	

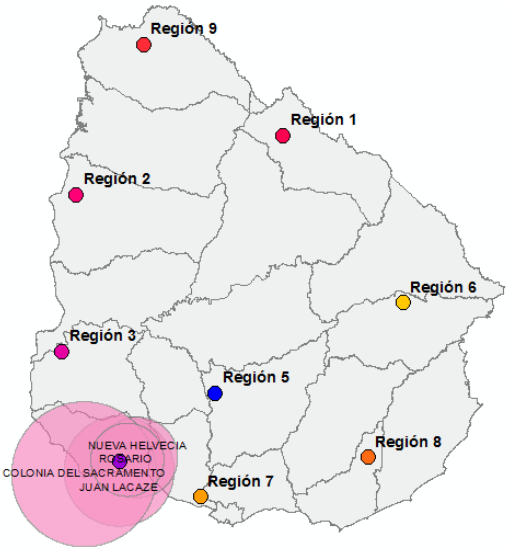


Gráfico 17.- Región 4 – Colonia del Sacramento, Juan Lacaze, Rosario y Nueva Helvecia

Región	Localidad	Habitantes	Población total
5	Durazno	34.368	89.436
	Florida	33.639	
	Trinidad	21.429	

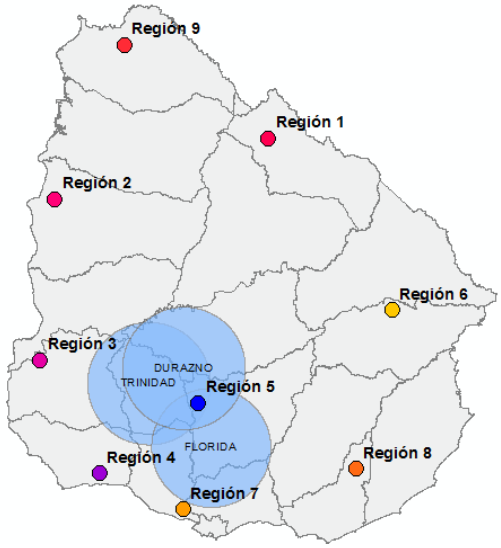


Gráfico 18.- Región 5 – Durazno, Florida y Trinidad

Región	Localidad	Habitantes	Población total
6	Melo	51.830	77.307
	Treinta y Tres	25.477	

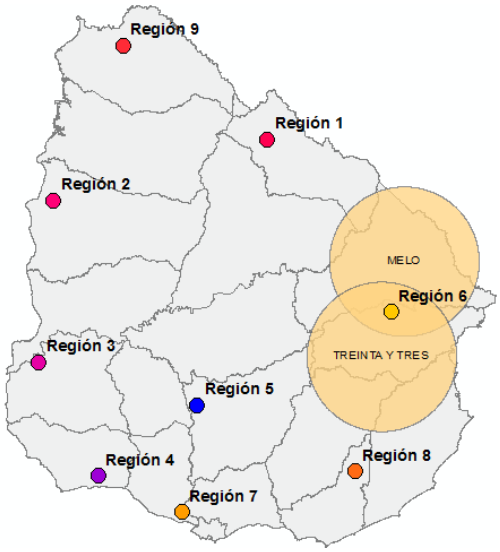


Gráfico 19.- Región 6 – Melo y Treinta y Tres

Región	Localidad	Habitantes	Población total
7	San José de Mayo	36.743	74.018
	Delta del Tigre y Villas	20.239	
	Libertad	10.166	
	Playa Pascual	6.870	

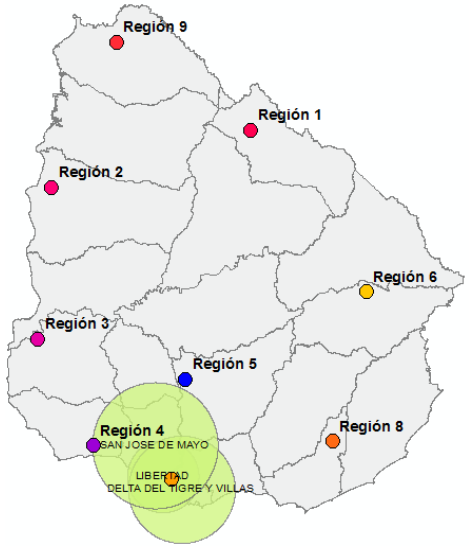


Gráfico 20.- Región 7 – San José de Mayo, Delta del Tigre y Villas, Libertad y Playa Pascual

Región	Localidad	Habitantes	Población total
8	Minas	38.446	63.868
	Rocha	25.422	

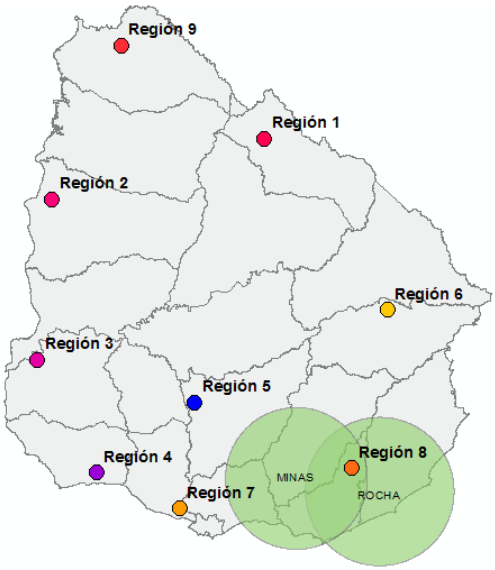


Gráfico 21.- Región 8 – Minas y Rocha

Región	Localidad	Habitantes	Población total
9	Artigas	40.657	53.258
	Bella Unión	12.200	

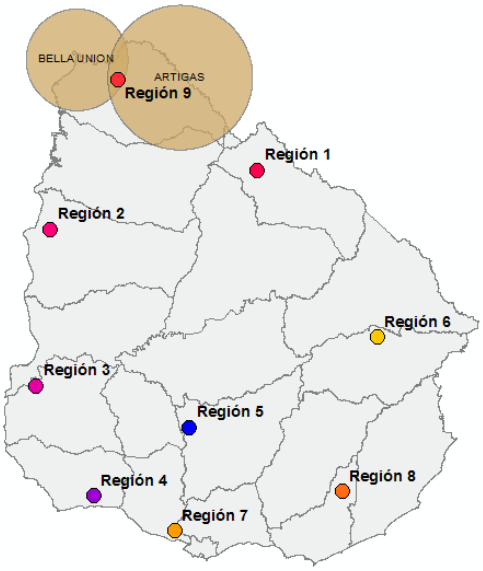


Gráfico 22.- Región 9 – Artigas y Bella Unión

Como ya se mencionó, las regiones fueron planteadas a partir de localidades con población mayor a 10.000 habitantes. Sin embargo para cada región se podría hacer un estudio con mayor grado de detalle, que permita incluir en la regionalización localidades con poblaciones menores.

En la Tabla 29se presentan las distancias entre las localidades dentro de cada región y las rutas que deben ser atravesadas. No se determinó la distancia de las localidades al RSa regional correspondiente ya que la ubicación exacta del mismo no está definida.

Región	Localidades	Distancia (km)	Ruta (s)
1	Rivera - Tacuarembó	112	5
2	Salto - Paysandú	120	3
3	Mercedes - Dolores	40,5	21
	Mercedes - Fray Bentos	34,2	2
	Dolores - Fray Bentos	73	21 ; 2
4	Colonia del Sacramento - Juan Lacaze	46	1 ; 54
	Colonia del Sacramento - Rosario	52,5	1 ; 2
	Colonia del Sacramento - Nueva Helvecia	62,5	1 ; 61 ; 53
	Juan Lacaze - Rosario	20,2	54 ; 1 ; 2
	Juan Lacaze - Nueva Helvecia	30,2	54 ; 1 ; 61 ; 53
	Rosario - Nueva Helvecia	15,9	2 ; 1 ; 61 ; 53
5	Durazno - Florida	91,6	5
	Durazno - Trinidad	42	14 ; 3
	Trinidad - Florida	131	3 ; 14 ; 5
6	Melo - Treinta y Tres	112,6	8
7	San Jose de Mayo - Delta del Tigre y Villas	66,3	11 ; 3 ; 1
	San Jose de Mayo - Libertad	42,5	11 ; 3 ; 1
	San Jose de Mayo - Playa Pascual	60,7	11 ; 3 ; 1
	Delta del Tigre y Villas - Libertad	26,3	1
	Delta del Tigre y Villas - Playa Pascual	6,1	1
	Libertad - Playa Pascual	20,5	1
8	Minas - Rocha	117	15 ; 109 ; 39 ; 13 ; 8
9	Artigas - Bella Unión	151	30 ; 3

Tabla 29.- Distancias y rutas entre localidades

4.1.4 Selección del caso de estudio

Una vez determinadas las potenciales regiones del interior del país se procede a seleccionar una de ellas para realizar el estudio de regionalización en detalle. En primera instancia, las regiones que no alcancen una población servida mayor a 80.000 habitantes serán descartadas. Luego se tomará como criterio para la selección la distancia entre las localidades, buscando que ésta sea la mínima, de forma de minimizar los costos de transporte.

También se tuvo en cuenta que la distribución de la población en las localidades comprendidas en la región fuera lo más homogénea posible, evitando las regiones con una localidad predominante frente a las restantes de menor escala. Al seleccionar un caso de estudio que presenta localidades con poblaciones similares el fenómeno de regionalización se hace más visible, en cambio si se optara por un caso de estudio con una localidad predominante la ventaja de regionalizar no sería tan notoria.

A partir de las regiones planteadas en la sección anterior se pudo estimar, de forma preliminar, la población servida por cada localidad[6], sin tener en cuenta las localidades con poblaciones menores a 10.000 habitantes, como ya fue mencionado.

Se optó por la Región 3, conformada por Mercedes, Dolores y Fray Bentos, siendo éstas las tres localidades con mayor población, superando los 80.000 habitantes. A su vez, si se incluyeran en la región localidades de menor población y muy cercanas a la zona, como por ejemplo: Palmitas, Chacras de Dolores y Villa Soriano, se alcanzaría una población total de 88.762 habitantes.

Cabe destacar que las localidades de Dolores y Fray Bentos se ubican a distancias similares de Mercedes, que a su vez es la localidad que concentra mayor población. Por lo tanto, en primera instancia se podría plantear colocar el RSa regional en un sitio cercano a Mercedes, con dos aportes de RSU muy similares provenientes de las otras dos localidades, y así analizar las diferencias económicas entre dicho relleno regional y un RSa local, que atienda únicamente la localidad de Mercedes.

En la Figura 11 se puede observar la distribución de las localidades para la Región 3, y las rutas nacionales que comunican dichas localidades.

[6] Las poblaciones presentadas son extraídas del Censo del 2011.

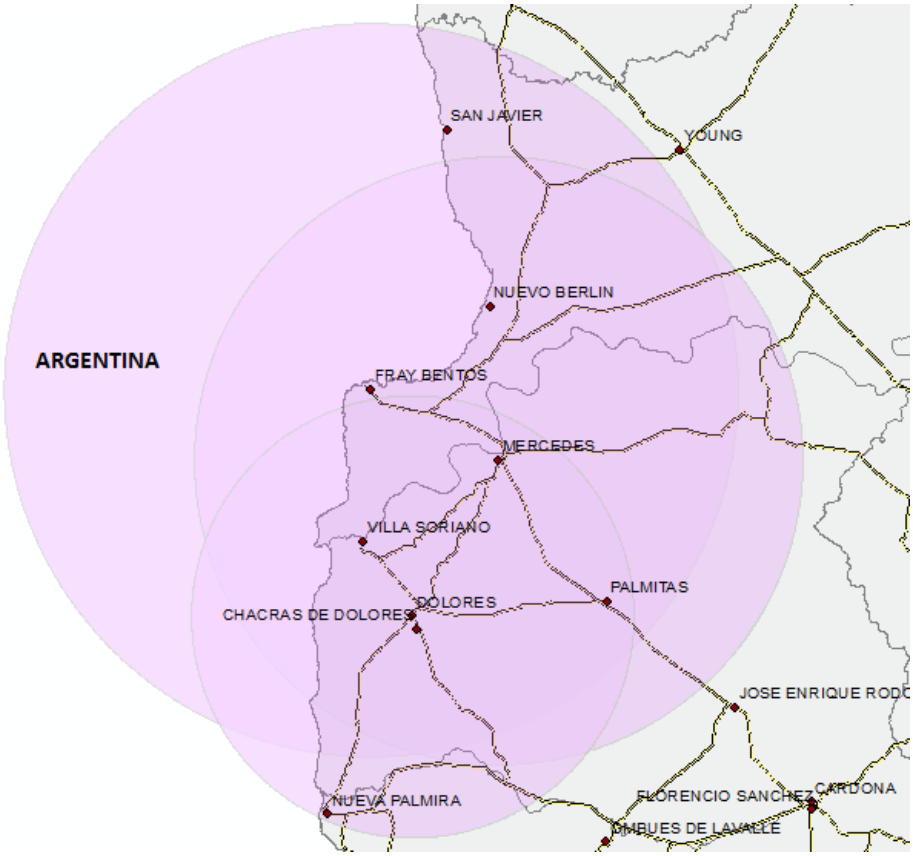


Figura 11.- Delimitación de la Región 3

4.2 Análisis de costos para la región seleccionada (Rellenos locales/Relleno regional)

Para la región seleccionada, se distinguen dos posibles alternativas en lo que refiere a la gestión de residuos: una en la que cada localidad cuenta con su propio RSa y otra donde existe un único RSa común para la región.

El propósito de esta Sección es realizar una evaluación económica entre los diferentes componentes que presentan las dos alternativas planteadas anteriormente:

- Recolección y Transporte
- Inversión del RSa
- Operación y Mantenimiento del RSa
- Generación de energía

4.2.1 Inversión y diseño del RSa

Tal como se plantea, la evaluación propuesta es compleja, ya que las distintas localidades por sus escalas y características llevan a diferentes elecciones en lo que respecta al diseño, operación, selección de tecnologías etc. para los componentes planteados. Debido a esto, se considerarán algunas hipótesis con el fin de simplificar y unificar los casos de estudio para que sean comparables entre ellos.

4.2.1.1 Datos generales y criterios de diseño

Población y tasas de generación:

Para cada localidad se determinó la población al año 2016 en función de la tasa de crecimiento poblacional anual y la cantidad de residuos generados al 2016 a partir de la tasa de generación. Las tasas empleadas para cada localidad fueron tomadas a partir de las determinadas anteriormente, ver Sección 2.1. de la Memoria de Cálculo, ubicándose a Mercedes y Fray Bentos en el rango de poblaciones entre 20.000 – 50.000 habitantes y Dolores entre 10.000 – 20.000 habitantes.

En el caso del relleno regional, no es posible determinar una tasa de crecimiento fija a lo largo de los años genere que la suma de la población de cada localidad coincida con la población servida del regional. Esto se debe a que la ecuación para la proyección de la población es del tipo potencial, y por lo tanto la tasa asociada al regional debería ser calculada para cada año n a partir de la siguiente ecuación:

$$P_R {t_R}^n = (P_{D,i} + P_{M,i} + P_{FB,i}){t_R}^{(n-i)} = P_{D,i}{t_D}^{(n-i)} + P_{M,i}{t_M}^{(n-i)} + P_{FB,i}{t_{FB}}^{(n-i)}$$

Siendo:

$P_{D,i}$ y t_D: Población en el año i, y tasa de crecimiento poblacional de Dolores
$P_{M,i}$ y t_M: Población en el año i, y tasa de crecimiento poblacional de Mercedes
$P_{FB,i}$ y t_{FB}: Población en el año i, y tasa de crecimiento poblacional de Fray Bentos
$P_{R,i}$ y t_R: Población en el año i, y tasa de crecimiento poblacional del Regional

Con el fin de simplificar los cálculos y estar del lado de la seguridad, se optó por utilizar para el Regional, la tasa de crecimiento asociada a una población de 80.000 habitantes, determinada en la Sección 2.1. de la Memoria de Cálculo. Por otro lado, la tasa de generación de residuos del relleno regional se calculó como el promedio ponderado por población de las tasas asociadas a las localidades.

En la Tabla 30 se presentan los datos de los RSa correspondientes a cada localidad y al Regional:

Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional
Datos generales				
Población (Censo 2011)	41.974	24.406	17.174	83.554
Tasa Crecimiento de población anual	1,001	1,001	1,005	1,007
Población (2016)	42.184	24.528	17.608	86.305
Tasa de generación (kg/hab/día)	0,73	0,73	0,70	0,72
Residuos generados al 2016 (ton/día)	30,8	17,9	12,3	62,1

Tabla 30.- Datos generales por localidad

Vida útil y módulos

Como primera hipótesis de trabajo se consideró que tanto los rellenos locales como el regional serán explotados mediante módulos de 5 años con un horizonte de proyecto de 20 años, por lo tanto se tendrán cuatro módulos. La construcción cada 5 años permite disminuir y distribuir la inversión en el tiempo, siendo ésta una opción más adaptable a la economía de los gobiernos departamentales que la gestionarán.

Por otro lado, los rellenos locales, según lo analizado en los capítulos anteriores, no alcanzan las escalas mínimas para que sea viable la generación de energía, en estos casos se captará el biogás y se quemará en antorcha sin realizar un aprovechamiento energético del mismo. Por lo tanto, realizar módulos cada 5 años es conveniente ya que en este caso la generación de energía no es un factor determinante a considerar.

Método de vertido:

La selección del método de vertido depende de cada caso particular, las principales variables que influyen son la superficie disponible, topografía del predio, condiciones del terreno y disponibilidad del material de cubrición, entre otros. (Ver Sección 2.4.4, Estudios Básicos)

A efectos del análisis se supondrá que el método de vertido de los rellenos en estudio se realiza en celdas excavadas. La profundidad de excavación se determinó teniendo en cuenta por un lado, el balance de material para cubrición, es decir que el material excavado logre cubrir la mayor parte de las necesidades de cubrición durante la vida útil del relleno, sin incurrir en profundidades excesivas que generen un aumento en los costos de excavación y posibles problemas de enterramiento de las conducciones del lixiviado.

Geometría de los módulos:

La geometría considerada de los módulos es cuadrada en planta y rectangular en corte, despreciándose los taludes a los efectos del cálculo de los costos.

En la Tabla 31, se presentan los datos del relleno:

Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional
Datos del Relleno				
Altura útil (m)	6	5	4	13
Área x modulo (ha)				
Módulo 1	1,34	0,94	0,81	2,50
Módulo 2	1,35	0,94	0,83	2,58
Módulo 3	1,35	0,94	0,85	2,67
Módulo 4	1,36	0,95	0,87	2,75
Área total módulos (has)	5,40	3,77	3,37	10,50
Perímetro módulos(m)	929,8	776,7	734,4	1200,7

Tabla 31.- Datos de los RSa

Impermeabilización del fondo y taludes

El fondo de las celdas está conformado por dos capas, una impermeable que evita la infiltración de los lixiviados hacia los estratos inferiores del terreno, y una capa drenante que los capta y conduce hacia su tratamiento.

Para dicho fondo, inicialmente se debe realizar una limpieza del área para remover el suelo vegetal, arboles, raíces y otros elementos que puedan interferir en la construcción y afectar la estanqueidad del RSa.

La impermeabilización de la base y taludes según las recomendaciones de la Propuesta Técnica para la Reglamentación (PTR) para rellenos clase I[7],debe contar con una capa arcillosa de 90 cm de espesor y conductividad hidráulica máxima de $1x10^{-7}$ cm/s, o su equivalente en material sintético, no pudiendo ser de espesor menor a 60 cm. En este caso se propone utilizar un sistema impermeable combinado arcilla-geomembrana, teniendo especial atención en la superficie de

[7] Rellenos clase I: *"Rellenos de seguridad, destinados a recepcionar residuos sólidos clasificados en la categoría I y II de la clasificación establecida en la presente reglamentación. Estos rellenos tendrán como objetivo principal el confinamiento en el terreno de los residuos dispuestos".*

contacto de las mismas, para lograr un buen contacto y que no presenten elementos que puedan dañar la geomembrana.

Para los casos en estudio se consideró una membrana de PEAD de 1,5 mm de espesor la cual será soldada y posteriormente se realizará la verificación de los ensayos correspondientes que garanticen su completa estanqueidad. Debido a la complejidad del proceso de colocación de la geomembrana, éste deber ser realizado por una empresa con experiencia en este tipo de trabajos.

Capa drenante y conducción de lixiviados:

La capa drenante es la encargada de captar y conducir los lixiviados generados hacia la planta de tratamiento. Está compuesta por un manto de arena de 30 cm de espesor, que se extiende a lo largo de toda la base del módulo, drenes de piedra partida y tuberías perforadas.

Los drenes consisten en tuberías de PVC perforadas rodeadas de un filtro de piedra partida o grava envuelto en un geotextil. Por otro lado, sobre la arena y bajo la primera capa de residuos también se coloca un geotextil, con el fin de proteger la arena.

Para el cálculo de la longitud de las tuberías, se supuso para todos los casos, dos tuberías principales de largo$L_{principal}$=$L_{módulo}$ - 10 m y dieciséis secundarias, cuatro a cada lado de las principales, de longitud $L_{secundaria}$ =$L_{módulo}$/4 - 5 m. El diámetro de dichas tuberías depende del caudal de lixiviado para el cual se diseñen; a los efectos del análisis de costos se supondrán de diámetro: D=110 mm

A continuación se presenta un esquema de la configuración de tuberías planteada:

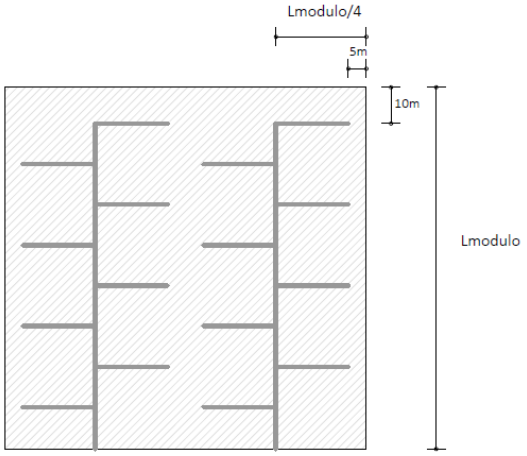


Figura 12.- Tuberías de conducción de lixiviado

Una vez fuera del módulo los lixiviados son conducidos por otras tuberías hacia la planta de tratamiento, por lo tanto, la longitud de las mismas dependerá de la disposición en el predio de los módulos y la planta de tratamiento. Como en este capítulo no se llega a alcanzar dicho grado de detalle, se supondrá una longitud aproximada de 100 m y un diámetro D=200 mm.

Producción de biogás:

Al igual que en los análisis anteriores, para calcular la producción de biogás, se utilizó la ecuación general de primer orden, para dos tipos de componentes de la fracción orgánica: rápida y lentamente degradables, con un coeficiente de corrección de 0,56, según lo desarrollado en la Sección 2.4.2. También se tuvo en cuenta que la captación del biogás comienza una vez clausurado el módulo.

Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional
Generación de biogás durante la vida útil del RSa				
Caudal máximo biogás (m^3/h)	44,9	26,1	19,0	130,2

Tabla 32.- Caudales máximos de biogás

Tratamiento del lixiviado

Para el tratamiento de efluentes se propone en todos los casos un sistema de lagunas de estabilización en serie (anaerobias y facultativas), las cuales se caracterizan por ser estructuras simples que mejoran las características del efluente mediante procesos de estabilización natural. Son sistemas robustos que requieren bajos costos de operación y mantenimiento, siendo una opción particularmente atractiva en casos donde no es posible contar con un servicio de tiempo completo de personal capacitado para poder operar y mantener el sistema.

El dimensionado de las lagunas de tratamiento dependerá principalmente del caudal de lixiviado generado y las características del mismo. Como para los rellenos locales no se profundizará en estas instalaciones, se realizará un dimensionado a grandes rasgos considerando una relación de áreas entre los módulos y las lagunas de tratamiento. Dicha relación se obtuvo a partir de las dimensiones de las lagunas de tratamiento del relleno regional las cuales sí fueron diseñadas en detalle, siendo aproximadamente un 3% del área total de los módulos.

Clausura de los módulos

Una vez finalizada la vida útil del relleno el mismo debe ser clausurado mediante la colocación de una capa de arcilla compactada de 0,6 cm de espesor y conductividad hidráulica máxima, según la PTR, de $1x10^{-7}$ cm/s. Luego, sobre esta capa de arcilla se colocará una geomembrana impermeable, de manera que no haya infiltración hacia la masa de residuos. La precipitación sobre el módulo será conducida por un sistema de drenaje de material granular o sintético ubicado sobre la geomembrana, sobre esta capa drenante se colocará un geotextil y luego una capa de 60 cm de espesor de cobertura vegetal.

4.2.1.2 Costos de inversión

A continuación se analizarán los costos asociados a la construcción de un relleno sanitario para cada una de las localidades de Mercedes, Dolores, Fray Bentos y un Relleno Regional que atienda a dichas tres localidades. Los costos pueden agruparse en:

Implantación de la obra:

Dentro de éstos se consideran la instalación y mantenimiento del obrador, el replanteo general y el suministro y colocación del centro perimetral.

Infraestructura general:

La infraestructura general comprende la compra del terreno, las oficinas y vestuarios, balanza, casetas de control, columnas y luminarias, estacionamiento, planta de tratamiento de lixiviados y captación y quema de biogás.

Respecto a la captación y quema del biogás, como se mencionó anteriormente la explotación de los rellenos propuesta es de módulos de 5 años; por lo tanto la inversión de la antorcha y el sistema de bombeo estarán considerados en la infraestructura general, ya que se realizan una única vez. Por otro lado, los costos del sistema de recolección (pozos de captación de biogás) serán tenidos en cuenta en los costos de clausura de cada módulo.

Construcción de módulos:

La construcción de los módulos prevé los costos asociados al movimiento de suelos, caminería, impermeabilización del fondo del vertedero, manto drenante y conducción de lixiviados.

Clausura de módulos:

Dentro de la clausura de los módulos se consideran los costos asociados a la cobertura final y al sistema de recolección de biogás.

4.2.1.3 Resultados

En la Tabla 33, se presentan los resultados de costos de inversión obtenidos para cada uno de los rellenos en estudio así como también de la suma de los tres rellenos locales.

Con el fin de poder realizar una comparación entre los costos del relleno regional y los 3 locales, se calculó el valor actual neto (VAN) para el período de 20 años (período en el cual se realiza la inversión). Para el cálculo de el VAN, se consideró una tasa de descuento del 10 % y una inflación anual del 8 %.

Relleno	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	3 Rellenos locales
Costos generales					
Implantación de la Obra	149.622	120.721	113.070	226.544	383.413
Infraestructura general	351.876	316.709	307.764	468.955	976.349
Construcción módulos					
Módulo 1	575.525	421.592	369.550	1.075.385	1.366.667
Módulo 2	576.105	423.503	377.941	1.107.442	1.377.548
Módulo 3	578.759	425.423	430.885	1.159.349	1.435.066
Módulo 4	581.426	427.352	440.803	1.171.662	1.449.581
Clausura módulos					
Módulo 1	217.673	159.900	133.801	166.849	511.375
Módulo 2	218.764	160.701	137.180	166.221	516.645
Módulo 3	219.860	161.507	140.644	176.290	522.010
Módulo 4	220.961	162.316	144.195	147.186	527.473
TOTAL Inversión	3.690.572	2.779.723	2.595.833	5.865.882	9.066.128
VAN de la inversión total	3.213.878	2.429.419	2.263.493	5.089.232	7.906.790
Costo inversión por ton dispuesta total (US$/ton)	14,3	18,6	25,3	11,2	17,8
Costo inversión per cápita (US$/hab)	76	99	129	59	92

Tabla 33.- Resumen de costos inversión

En el Gráfico 23 pueden observarse comparativamente los VAN de las inversiones durante los 20 años de vida útil, para cada uno de los rellenos:

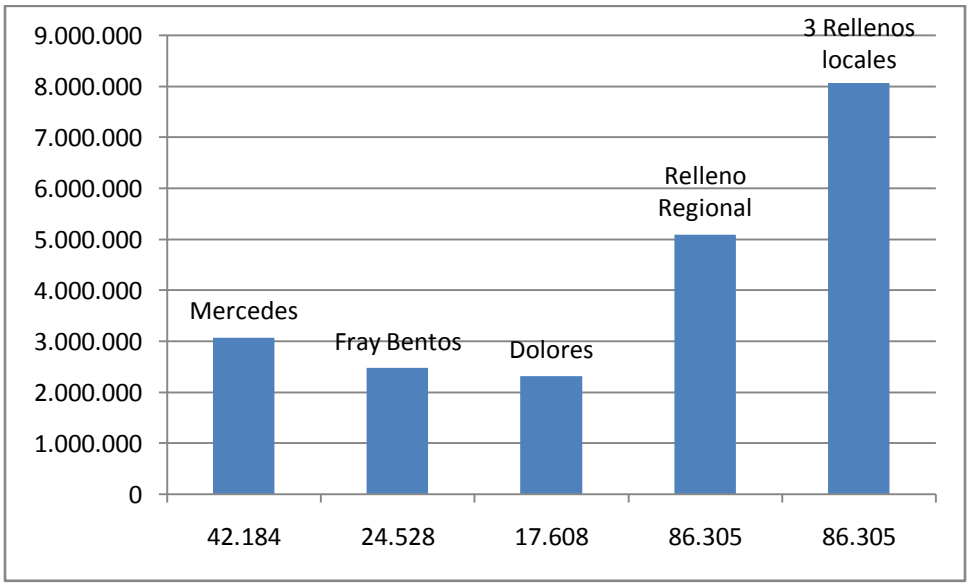


Gráfico 23.- VAN inversión

Uno de los principales propósitos de este análisis es lograr representar y cuantificar el efecto que tiene el factor de escala de los diferentes rellenos sobre los costos, en este caso particular, sobre los costos de inversión. Como se puede observar claramente en el Gráfico 24, a medida que la

población aumenta, los costos de inversión por tonelada dispuesta decrecen, siguiendo una tendencia potencial. Este es un claro indicio del beneficio económico que significaría la elección de un relleno regional frente a tres rellenos locales.

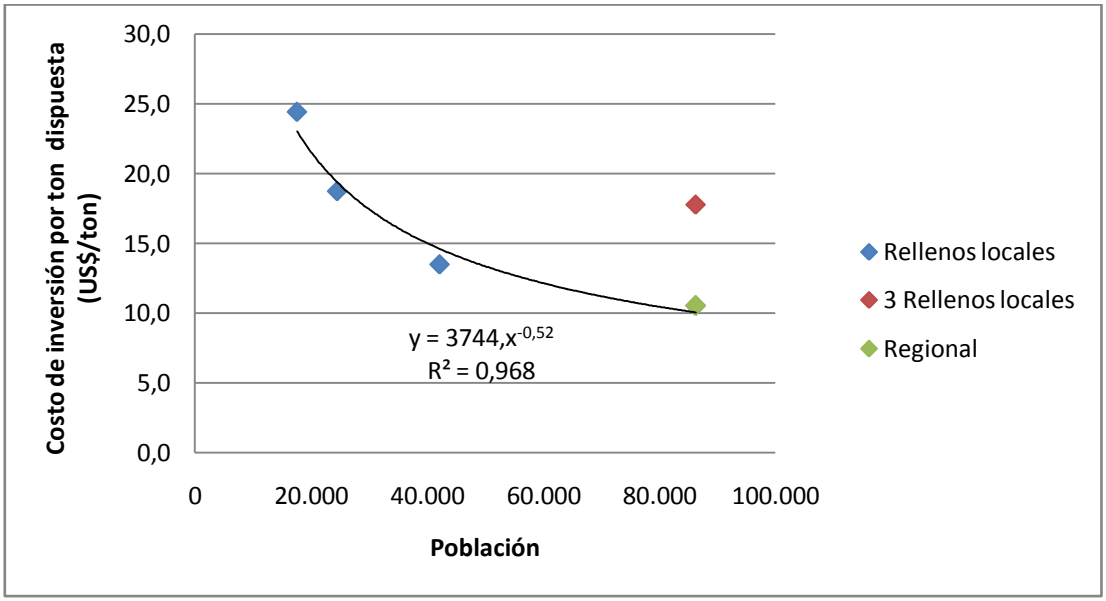


Gráfico 24.- Costos de inversión por tonelada dispuesta

4.2.2 Recolección y transporte

La recolección y el transporte de los residuos es una etapa de la gestión integral de gran peso económico, representando aproximadamente entre un 50 – 70 % del costo total, [2].

La distancia a la cual se debe transportar los residuos es una variable de gran importancia, ya que su incremento puede generar que el transporte directo no sea económicamente eficiente, siendo necesario incluir operaciones de transferencia.

Se supuso que los rellenos locales están ubicados en los sitios de disposición final que hoy en día se encuentran en actividad para cada una de las localidades.

En la Figura 13se presenta la ubicación propuesta para el análisis, de los RSa locales y el regional:

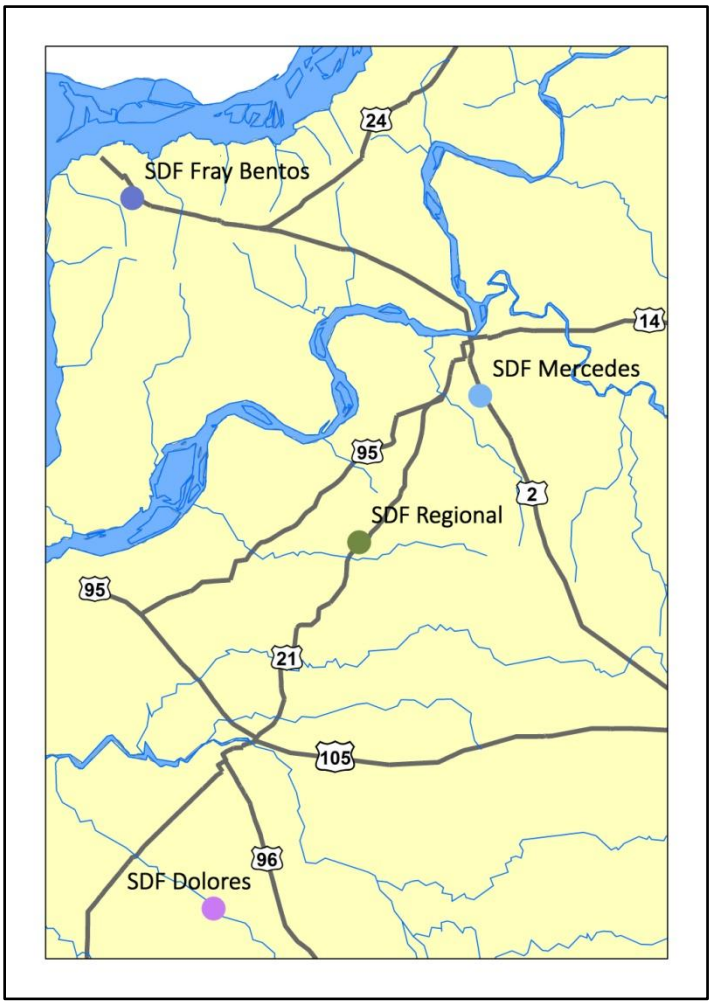


Figura 13.- Ubicación rellenos sanitarios

En la Tabla 34 se presentan los valores de las distancias a los RSa locales y al regional

Distancias al RSa (km)		
	Local	Regional
Mercedes	4	16
Fray Bentos	2	50
Dolores	17	19

Tabla 34.- Distancias al RSa

Se realizará una comparación de costos de transporte para cada una de las alternativas planteadas: rellenos locales o un relleno regional. A su vez, teniendo en cuenta que las distancias de transporte hacia el RSa regional se incrementan en comparación con las distancias a los rellenos locales, se analizará la necesidad de incluir para este caso una estación de transferencia (ET). Por lo tanto, los escenarios analizados fueron los siguientes:

Relleno regional:

- Sin estación de transferencia: Los camiones realizan la recolección en la ciudad y el transporte directo hacia el RSa regional.

- Con estación de transferencia: Los camiones realizan la recolección en la ciudad descargan los RSU en la ET y continúan la recolección, mientras que los camiones que reciben la carga en la ET son los encargados de transportarlos hacia el RSa regional.

Relleno local:

- Sin estación de transferencia: Los camiones realizan la recolección en la ciudad y el transporte directo hacia el RSa local.

En las ciudades en estudio actualmente la recolección de residuos se realiza en horario nocturno mediante levante manual de bolsas, con una frecuencia de seis veces por semana.

El Departamento de Soriano no tiene previsto implementar sistemas contenerizados de recolección de residuos debido a la restricción en el ancho de las calles y al buen funcionamiento actual del sistema actual de levante[8]. Sin embargo la ciudad de Rio Negro tiene planificado para el 2016 un plan de educación con el objetivo de lograr implementar un sistema contenerizado de recolección en el 2017[9].
A los efectos del análisis económico se supuso una recolección manual en todas las localidades, con una frecuencia de seis veces por semana.

Respecto a la flota de camiones de recolección, se prevé una renovación total de la misma para cumplir con el incremento en el recorrido hacia el relleno regional.

4.2.2.1 Dimensionado de la flota de camiones

Para estimar la mano de obra necesaria y dimensionar la capacidad y cantidad de vehículos, se debe determinar el tiempo requerido para llevar a cabo cada tarea, teniendo en cuenta los diferentes tiempos dentro de la jornada laboral (tiempo recolección, transporte, descarga, descanso y tiempo muerto)

El tiempo de recolección es una de las incógnitas ya que depende de la distancia a recorrer en la recolección y la capacidad de los camiones. En general en lugares con alta densidad de población, por ejemplo Montevideo, los recorridos de recolección se ven limitados por la capacidad de carga de los camiones; sin embargo en localidades con baja densidad de población, como ser en el interior del país, las distancias a recorrer son mayores y la generación de residuos en el recorrido es pequeña, siendo en este caso el tiempo de recolección el limitante.

[8] Fuente: Comunicación con Lic. Alejandro Rusch, Intendencia de Soriano, Área Ambiental
[9] Fuente: Comunicación con Lic. María A. Cabrera, Intendencia de Rio Negro, Directora proyecto Más Rio Negro

Distancia de recolección:

El diseño de circuitos de recolección eficientes es complejo ya que depende de cada caso particular; no hay normas fijas que puedan aplicarse en todas las situaciones. Por lo tanto para determinar el tiempo de recolección se asumió que el recorrido total es la longitud de los ejes de calle de la trama urbana, multiplicado por un coeficiente de 1,5 que representa las posibles ineficiencias del circuito que implica que se recorra más de una vez un mismo tramo.

La velocidad de recolección depende entre otras cosas del número de operarios y cantidad de residuos a ser recolectados por unidad de distancia. En este caso se asume una velocidad promedio de recolección de 5,5 km/h, [1].

Capacidad de los camiones y turnos de recolección

A efectos de simplificar los cálculos se asume que toda la flota de camiones de cada localidad tiene la misma capacidad.

Para llenar camiones de gran capacidad (>= 5 ton), son necesarios largos tiempos de recolección, que superan el tiempo máximo disponible (5 hs) en una jornada. Por lo tanto, para utilizar estas capacidades se requieren dos turnos de recolección, lo que implica un aumento en los costos por recursos humanos.

Por otro lado, camiones de menor capacidad (< 5 ton), pueden completarse en una sola jornada, pero se requiere un mayor número de camiones para recolectar la cantidad de residuos generada diariamente y en consecuencia una mayor inversión en la flota de recolección.

Analizando esta situación se determinaron los turnos de recolección para cada localidad. Se observó que en las localidades con mayor generación de residuos (Mercedes y Fray Bentos) es más conveniente utilizar camiones de mayor capacidad y dos turnos de recolección, de lo contrario se debería tener una extensa flota de camiones recolectores lo que implicaría grandes inversiones.

Para localidades con menor generación diaria de residuos como Dolores, resulta más favorable utilizar camiones de menor capacidad y un turno de recolección.

El cálculo y procedimiento para el dimensionado de la flota de recolección se detalla en la Sección 3.2.2. de la Memoria de Cálculo.

4.2.2.2 Costos de inversión

Flota de camiones:

Respecto a la flota de camiones, como se mencionó anteriormente, se prevé la renovación del 100 % de la misma. Tanto los camiones de recolección como los de transporte desde la ET, son compactadores cerrados.

El equipo recolector compactador se monta sobre un chasis. La elección del tipo de chasis depende principalmente de la capacidad de carga (toneladas) y la potencia necesaria (HP).



Figura 14.- Equipos recolectores, modelo CS6 y chasis

Para los equipos recolectores traseros, se seleccionó el modelo CS6 de la empresa argentina SCORSA, que cuenta con una amplia experiencia en el mercado de equipos de limpieza urbana. Estos equipos permiten la recolección de residuos por carga manual y/o mecanizada, el sistema de descarga se realiza con una placa expulsora e izaje de cola que permite la descarga en los RSa o ET. Las capacidades de las cajas varían entre 12 y 24 m^3, y su peso entre 4,3 y 6,4 toneladas (equipo vacio). El chasis seleccionado para montar este tipo de equipos es de 17 toneladas de capacidad y 220 HP[10].

Estación de transferencia

Para el cálculo de la inversión de la estación de transferencia se consideró la compra del terreno dentro de la ciudad, caseta de control, estacionamiento y patio de maniobras, cercado perimetral del predio, baño y oficina. El costo de inversión total de la misma es de: US$ 348.000.

[10] Comunicación personal, Ing. Hid/Amb Luis Horta, Jefe de Proyectos ABENGOA TEYMA

4.2.2.3 Operación y mantenimiento

Recursos humanos

Los recursos humanos considerados son los choferes de los camiones y ayudantes de los choferes.

Para realizar las tareas de recolección se consideraron tres operarios por camión, un chofer y dos ayudantes que realizan el levante manual de los RS. En el caso de incluir una ET, el transporte al RSa es realizado por dos operarios, un chofer y un ayudante.

Combustible y mantenimiento

Los costos de combustible, neumáticos y lubricantes aumentan linealmente en función de los kilómetros recorridos, y se obtuvo un costo total de 0,8 US$/km, ver Sección 3.2.2.3 Memoria de Cálculo.

Amortización de la flota

La amortización de la flota se realizó considerando una vida útil de los camiones de 10 años.

Operación y Mantenimiento ET

En los costos por operación y mantenimiento de la ET se tienen salarios y gastos fijos como ser UTE, ANTEL, OSE, herramientas, limpieza etc.

Respecto a los recursos humanos, se tuvieron en cuenta tres turnos de un sereno encargado de la vigilancia del lugar, ya que la ET puede ser utilizada para guardar los camiones de recolección cuando no estén en actividad. Por otro lado, en función de los turnos de funcionamiento de la ET se consideró un administrativo o jefe de la ET cuyas tareas principales son la coordinación y supervisión de las operaciones llevadas a cabo.

Resultados operación y mantenimiento:

A continuación se presentan los costos de operación y mantenimiento obtenidos para el transporte y recolección de cada relleno local.

	Relleno local			
	Costos (US$/día)			**Costo total**
Localidad	**Combustible y mantenimiento**	**Recursos humanos**	**Amortización flota**	**(US$/día)**
Mercedes	214	1137	192	1543
Fray Bentos	156	1137	185	1478
Dolores	224	711	231	1166

Tabla 35.- Costos operación y mantenimiento, relleno local

A continuación se presentan los costos de operación y mantenimiento obtenidos para el relleno regional para las diferentes situaciones en estudio:

Relleno regional con ET					
Localidad	Costos (US$/día)				Costo total (US$/día)
	Combustible y mantenimiento	Recursos humanos	Amortización flota	Operación ET	
Mercedes	297	1341	240	213	2092
Fray Bentos	298	1341	233	213	2085
Dolores	113	813	279	173	1378

Tabla 36.- Costos operación y mantenimiento, relleno regional con ET

Relleno regional sin ET				
Localidad	Costos (US$/día)			Costo total (US$/día)
	Combustible y mantenimiento	Recursos humanos	Amortización flota	
Mercedes	297	1137	192	1626
Fray Bentos	466	1137	187	1790
Dolores	241	711	231	1183

Tabla 37.-Costos operación y mantenimiento, relleno regional sin ET

4.2.2.4 Resultados

A partir de los costos de inversión, operación y mantenimiento de la recolección y transporte se realizó un análisis financiero con el fin de comparar y seleccionar el sistema más apropiado para cada localidad.

Para realizar el análisis se calculó el Valor Actual Neto (VAN) de los costos asociados, durante 20 años. A su vez, en todos los casos se consideró una renovación de toda la flota de camiones a los 10 años.

La tasa de descuento y e inflación utilizadas fueron 10% y 8% respectivamente, al igual que en los análisis financiaros anteriores.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

	Costo total con VAN US$ (20 años)		
	Regional		Local
	Con ET	Sin ET	
Mercedes	12.429.086	9.415.904	8.974.913
Fray Bentos	12.370.552	10.258.892	8.606.896
Dolores	8.837.324	7.249.790	7.160.881

Tabla 38.- Costo total VAN 20 años

	Costos US$/ton		
	Regional		Local
	Con ET	Sin ET	
Mercedes	54,8	41,5	39,5
Fray Bentos	93,7	77,7	65,2
Dolores	93,6	76,8	75,9

Tabla 39.-Costos US$/ton, recolección y transporte

Se concluye entonces que en el caso del relleno regional, para todas las localidades en estudio, el sistema de transporte sin estación de transferencia es el más favorable desde el punto de vista económico.

Por otro lado, los costos de recolección y transporte al relleno son menores si se consideran tres rellenos locales en vez de un único relleno regional.

4.2.2.5 Análisis estación de transferencia

Con el fin de representar la influencia de la distancia del transporte sobre los costos y el efecto de la incorporación de una estación de transferencia, se graficaron los costos de transporte para el caso del relleno regional en US$/km, ver Gráfico 25.

		Con ET	Sin ET
	Distancia al RSa (km)	US$/km	
Fray Bentos	50	42	36
Dolores	19	73	62
Mercedes	16	131	102

Tabla 40.- Costos por distancia al relleno regional

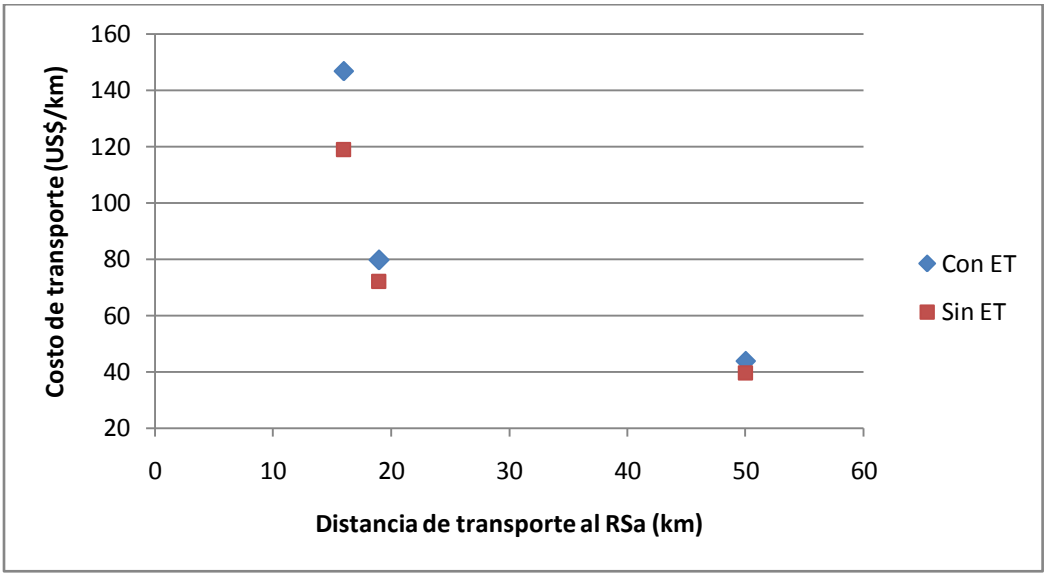


Gráfico 25.- Costos de OyM transporte al RSa regional en función de las distancias a recorrer

En el Gráfico 25se observa que, para localidades con menores distancias de transporte el costo de operación y mantenimiento es menor sin ET, en comparación al sistema con ET. Sin embargo la diferencia entre dichos costos disminuye a medida que se incrementan las distancias.

Este resultado era de esperarse, ya que a partir de cierta distancia es lógico que comience a ser más barato transportar el volumen de residuos en camiones de gran capacidad que transportarlo en camiones de pequeña capacidad. Igualmente, en los casos analizados no se superó la distancia que determina una ventaja económica debido a la incorporación de una ET.

4.2.3 Operación y Mantenimiento

El modo de operación y mantenimiento de los RSa, en lo que refiere a su grado de mecanización y turnos de trabajo, dependen en gran medida de las toneladas de residuos que ingresan diariamente.

Dado que los RSa analizados atienden a diferentes tamaños de poblaciones, se decidió suponer tres alternativas para la operación y mantenimiento de cada relleno, para luego optar por la más favorable desde el punto de vista técnico y económico. Los escenarios planteados fueron los siguientes:

- 2 turnos diarios mecanizados
- 1 turno diario mecanizado
- 1 turno diario semi-mecanizado

A los efectos de determinar la opción más viable para cada localidad, se supondrá que el crecimiento anual de los residuos a procesar es considerablemente bajo, y por lo tanto no se tendrán costos variables, es decir respecto a las toneladas promedio a operar, las diferencias serán poco significativas y no justifican complejizar el análisis.

Para todos los casos la operación del relleno será de lunes a sábados ya ésta fue la frecuencia definida para la recolección y transporte de los residuos, ver Sección 4.2.2.

4.2.3.1 Maquinaria

La selección de los equipos para operar el relleno es de gran importancia, teniendo en cuenta que la capacidad de compactación de los mismos es una variable que impacta directamente sobre la vida útil del RSa, estabilidad de los taludes proyectados y el desempeño de la planta de biogás, entre otros.

Asimismo, es necesario realizar una correcta elección según la capacidad de procesamiento de residuos, ya que si se selecciona un equipo de capacidad insuficiente el mismo trabajará sobreexigido, lo cual puede generar problemas de inadecuada operación del relleno e interrupciones frecuentes por mantenimiento de la maquinaria. Por otro lado, seleccionar equipos que excedan la capacidad necesaria, implicaría mayores costos de inversión en equipamiento que estará subutilizado.

Para las tareas de tendido y compactación de los residuos, las máquinas recomendadas, según el Manual de Rendimiento CATERPILLAR, son los tractores sobre orugas, cargadores sobre orugas y compactadores para rellenos sanitarios.

Tractores sobre orugas

Los tractores sobre orugas son máquinas muy usuales en los rellenos sanitarios. Están dotados con una hoja topadora que le otorga una gran versatilidad y practicidad, siendo capaces de realizar

tanto las tareas de tendido y compactación de residuos y material de cubrición, como también la preparación del sitio, construcción de caminos de acarreo, tumbar árboles etc.
Permiten alcanzar densidades de compactación del orden de los 475 a 590 kg/m^3, obteniéndose la compactación máxima cuando se trabaja con pendientes 3:1 o menores.
Si bien son máquinas que pueden realizar el movimiento del material de cubrición, tienen un límite económico de movimiento de material de aproximadamente 90 metros.




Figura 15.- Tractor de cadenas, CAT D6T

Cargadores sobre orugas

Al igual que los tractores sobre orugas son máquinas de gran versatilidad capaces de realizar diversas tareas. Las densidades de compactación alcanzadas son similares o ligeramente superiores a las del tractor sobre orugas, 475 a 590 kg/m^3.
Están dotados de palas que permiten cargar y transportar el material de cubrición.





Figura 16.- Cargador de cadenas, CAT 953

Compactadores para rellenos sanitarios

Son máquinas especializadas para esparcir y compactar grandes volúmenes de residuos, ofreciendo velocidades de operación mayores a las de las máquinas sobre orugas. Proporcionan niveles de compactación de 710 a 950 kg/m^3.

Tienen capacidad de operar en pendientes de hasta 4:1



Figura 17.- Compactadora de residuos, CAT 816F

Maquinaria seleccionada para los escenarios planteados

Para el escenario de operación semi-mecanizado, se optó por utilizar el cargador de cadenas CAT 953.Dado que además de tender y compactar los residuos es capaz de cargar el material de cubrición, en este caso no sería necesario incorporar una pala cargadora.

En el caso del escenario de operación mecanizado, se seleccionó el compactador de residuos CAT 816 F, para las tareas de tendido y compactación de los residuos y cubrición diaria. A su vez se incorporará una pala cargadora para realizar la carga del material de cubrición y un camión para el transporte del mismo.

En la Tabla 41 se presentan los equipos considerados en cada caso:

Maquinaria y vehículos		
Equipo	**1 y 2 turnos mecanizado**	**1 turno semi-mecanizado**
Compactadora de Residuos 816	1	-
Pala cargadora	1	-
Camión	1	1
Cargador de cadena 953	-	1

Tabla 41.- Maquinaria y vehículos considerados

Dado que en ninguno de los casos la maquinaria trabajará sobreexigida, se consideró una vida útil de 20 años. En el caso de los camiones, se consideraron 10 años.

El consumo de combustible por hora de trabajo de la maquinaria se obtuvo del Manual de Rendimientos CATERPILLAR, en función del tipo de trabajo que realiza. En todos los casos se consideró una aplicación media del trabajo[11].

[11] La aplicación media de trabajo es definida en el Manual de Rendimientos CATERPILLAR como:trabajo con la hoja y empuje de traíllas en la carga de arcilla, arena, limo, grava suelta. Despejoen torno de la pala mecánica. Compactación normal

4.2.3.2 Recursos humanos

Los recursos humanos fueron seleccionados en función de las diferentes tareas que deben llevarse a cabo en el RSa, ver Memoria Operativa. La cantidad de personal se definió en función de la cantidad de turnos de trabajo; particularmente en el caso de los maquinistas se consideró un operario adicional teniendo en cuenta suplencia, licencias etc. dado que realizan una tarea fundamental e indispensable para que el relleno pueda permanecer en funcionamiento.

Los recursos humanos considerados en cada uno de los escenarios, fueron los siguientes:

Recursos humanos			
Cargo	**2 turnos mecanizado**	**1 turno mecanizado**	**1 turno semi-mecanizado**
Chofer Compactadora de Residuos	3	2	-
Chofer Pala Cargadora	3	2	-
Chofer Cargador sobre orugas	-	-	2
Chofer de Camión	2	2	2
Administrativo	2	2	1
Coordinador/jefe del RS	2	1	1
Técnico Hidráulico-Ambiental	1	1	1
Peones	2	2	1
Guardia	3	3	3
Totales	18	15	11

Tabla 42.- Recursos humanos, operación y mantenimiento

4.2.3.3 Mantenimiento de la caminería

El mantenimiento de los caminos interiores es de gran importancia ya que éstos son los que aseguran la accesibilidad y circulación segura en el relleno en cualquier época del año. Dichos caminos se ven deteriorados por diferentes factores como el tránsito de camiones y la lluvia, por lo que se debe prever su mantenimiento, tantas veces al año como sea necesario.

En este caso en base a recomendaciones de técnicos[12] en el área, se consideró que el mantenimiento de la caminería se realiza mensualmente.

4.2.3.4 Costos operación y mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento comprenden la inversión en la maquinaria y vehículos, salarios de recursos humanos, combustible y amortización de la maquinaria, mantenimiento de la caminería, monitoreo ambiental y otros costos fijos.

Con el fin de poder representar los costos de operación y mantenimiento a lo largo de la vida útil del relleno, se calculó el VAN durante los 20 años, con una tasa de descuento del 10% y una inflación anual del 8%. A su vez, se consideró una primera inversión en maquinaria al inicio de la

[12] Comunicación personal, Ing. Sebastián Bajsa

operación y una reinversión en camiones a los 10 años de funcionamiento. Luego para obtener los costos por tonelada se dividió la VAN entre las toneladas totales de residuos dispuestos durante la vida útil del relleno.A continuación se presentan los resultados obtenidos:

	Costo anual OyM por ton dispuesta (US$/ton)				
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	3 Rellenos
2 turnos mecanizado	42,3	66,7	89,2	24,6	
1 turno mecanizado	36,4	58,1	79,2	23,0	53,86
1 turno semi mecanizado	32,5	51,0	65,1	35,6	

Tabla 43.- Costo OyM por tonelada dispuesta

En el Gráfico 26se representan los diferentes resultados obtenidos para las diferentes localidades representadas según su población.

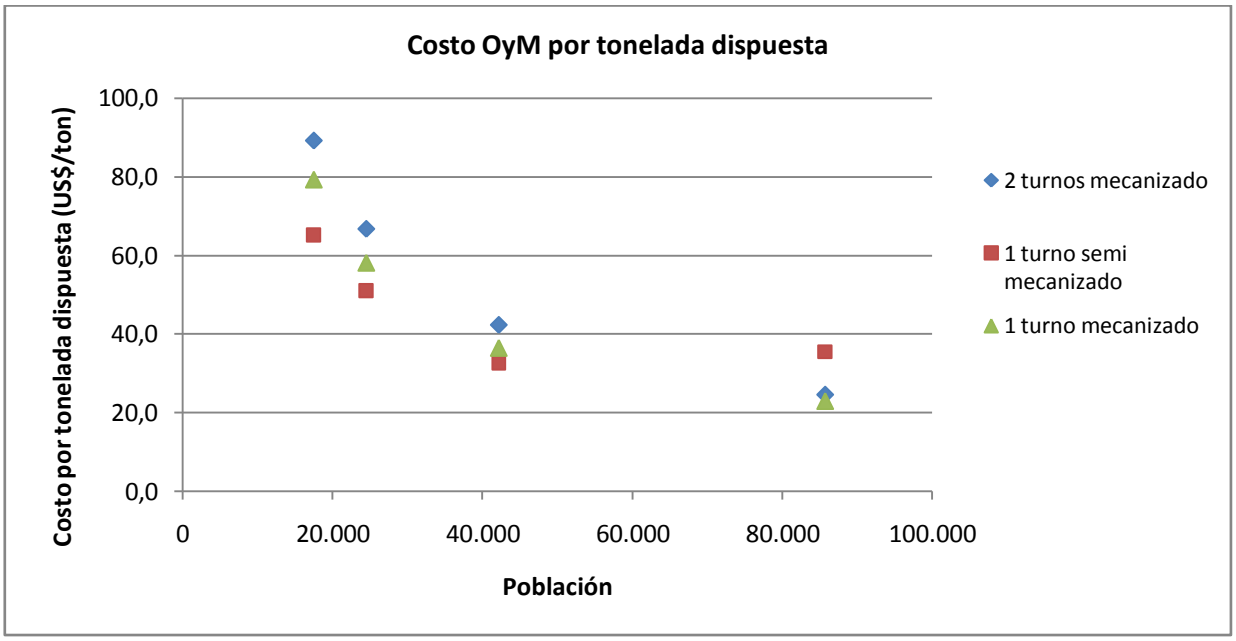


Gráfico 26.- Costo OyM por tonelada dispuesta

Para las poblaciones menores, se pueden observar grandes diferencias entre los costos asociados a cada modo de operación, siendo la alternativa semi mecanizada la más apropiada en estos casos. Sin embargo, a media que aumenta la población servida las alternativas mecanizadas se vuelven opciones más económicas.

Para seleccionar la modalidad de operación del RSa es fundamental, además de los costos, tener en cuenta la frecuencia y los turnos de trabajo de la recolección y transporte de residuos ya que estos definirán la cantidad de turnos y días de operación del RSa.

A partir del análisis de recolección y transporte de los residuos hacia el relleno se definó que en las localidades de Mercedes y Fray Bentos funcionan con dos turnos, mientras que Dolores tendrá un

único turno de recolección. En función de estos resultados se decide descartar la alternativa de un turno mecanizado, ya que para Mercedes y Fray Bentos es necesario que el RSa funcione con dos turnos, mientras que para Dolores resulta más conveniente la operación mediante un turno semi-mecanizado frente al mecanizado. A su vez, el regional también funcionará con dos turnos mecanizados.

4.2.4 Generación de energía

Dado que, en el análisis de generación de energía planteado en la Sección 2, se obtuvo que para rellenos sanitarios de escala entre 80.000 y 100.000 habitantes, explotados mediante módulos de 5 años, el proyecto no era económicamente factible, en este caso se planteará una situación diferente para el caso del relleno regional.

La principal diferencia radica en los costos componentes de la inversión, en este caso, no se considerarán los pozos de recolección de biogás, antorcha ni el sistema de bombeo dentro de los costos de inversión de la planta de generación de energía, ya que los mismos estarán contemplados como parte de la infraestructura general y clausura de los módulos del RSa.

Por lo tanto, en el análisis se tendrán en cuenta únicamente las inversiones asociadas a los motores de combustión interna para las dos etapas y la conexión a la red. A su vez, se analizará la situación para el caso de financiación con fondos propios y sin considerar los impuestos.

A continuación se presentan las curvas asociadas al biogás generado y al potencialmente captado para el relleno regional. El modelo utilizado para estimar la generación de biogás es el general con dos fases de degradación y factor de corrección 0.56 cuya elección se justifica en la Sección 2.4.

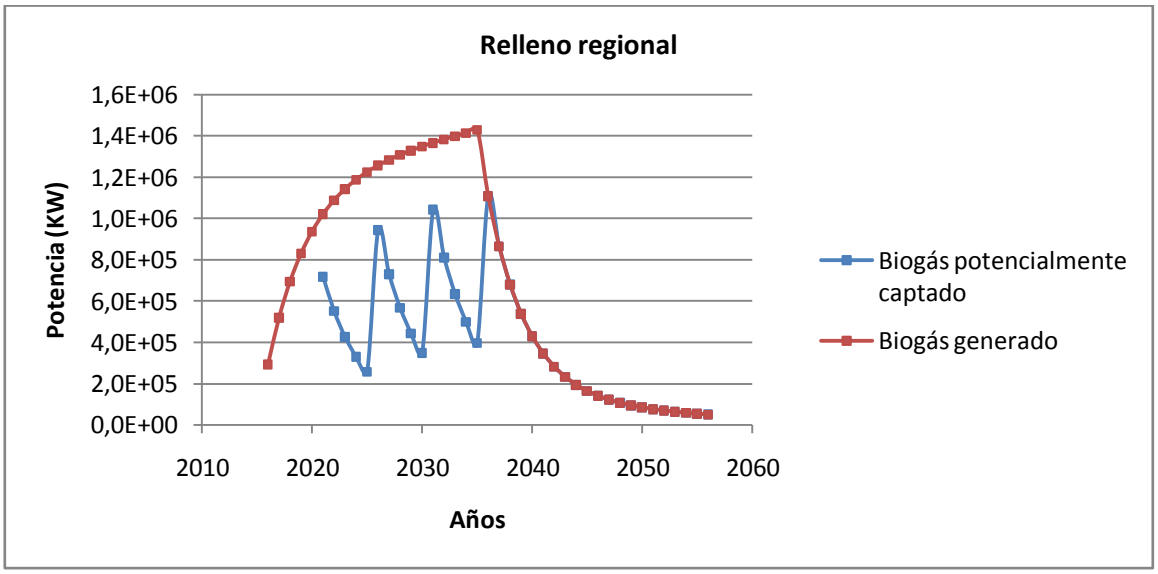


Gráfico 27- Biogás generado y potencialmente captado

Se consideraron 21 años de funcionamiento de la planta de generación de energía es decir desde el 2021 al 2041, por lo tanto se consideraron dos etapas de motores de 10 y 11 años de funcionamiento. Las capacidades de los motores, utilización y costos se presentan en la Tabla 44.

Relleno Regional					
Etapa	Duración (años)	Equipo	Motor (kW)	Costo (US$)	Utilización
1	10	Motor de combustión interna	170	187.000	53%
2	11		180	198.000	53%

Tabla 44.- Motores de combustión interna seleccionados para cada etapa del relleno regional

El precio medio de venta a lo largo del período para el cual se obtiene VAN=0, obtenido del análisis financiero fue de 78 US$/MWh. Por otro lado, la VAN y TIR obtenidos con el precio de venta de 125 US$/MWh fueron de 294.291 US$ y 29 % respectivamente.

4.2.5 Resultados y conclusiones

En la Tabla 45, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las componentes de la gestión integral de residuos analizadas, los valores presentados corresponden al valor actual neto (VAN) del flujo de fondo durante el período considerado (20 años), también se presentan los costos asociados por tonelada dispuesta.

	Dolores	Fray Bentos	Mercedes	Regional	3 Rellenos
Población (2016)	17.608	24.528	42.184	86.305	86.305
Operación y Mantenimiento del Relleno	VAN (US$)				
	6.011.211	8.800.346	9.603.360	11.136.959	24.414.917
	Costo por ton dispuesta (US$/ton)				
	65,1	66,7	42,3	24,6	53,9
Inversión del Relleno	VAN (US$)				
	2.305.410	2.474.408	3.066.726	5.089.232	8.053.212
	Costo ton dispuesta (US$/ton)				
	24,4	18,8	13,5	10,6	17,8
Inversión Recolección + Transporte	VAN (US$)				
	1.008.560	806.848	835.924	2.658.601	2.651.332
	Costo por ton dispuesta (US$/ton)				
	10,7	6,1	3,7	5,8	5,5
OyM Recolección + Transporte	VAN (US$)				
	6.152.321	7.800.048	8.138.990	24.265.986	22.091.359
	Costo por ton dispuesta (US$/ton)				
	65,2	59,1	35,9	48,7	50,3
Generación de energía	Ingreso por generación de energía (US$)				
	-	-	-	294.291	-

Tabla 45.- Resultados

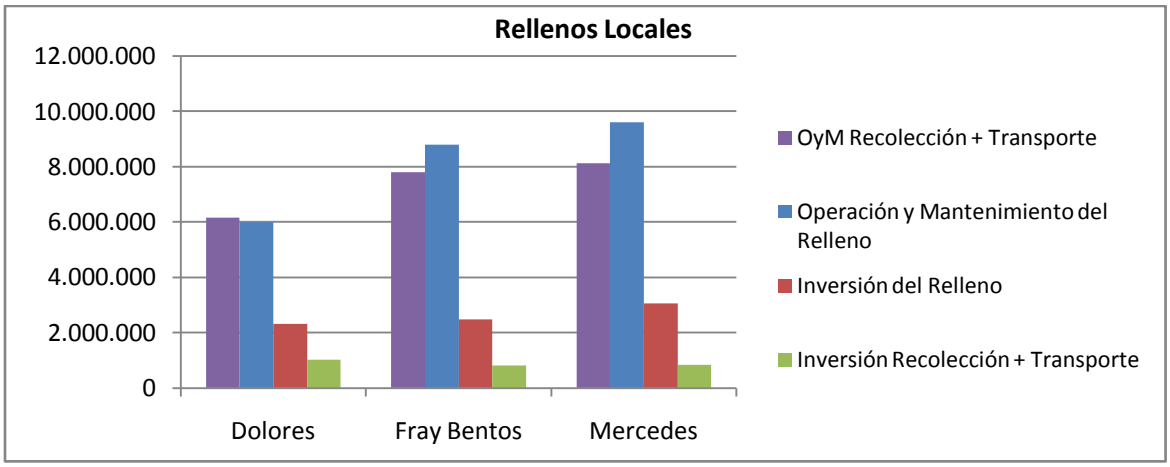


Gráfico 28.- VAN, Rellenos locales

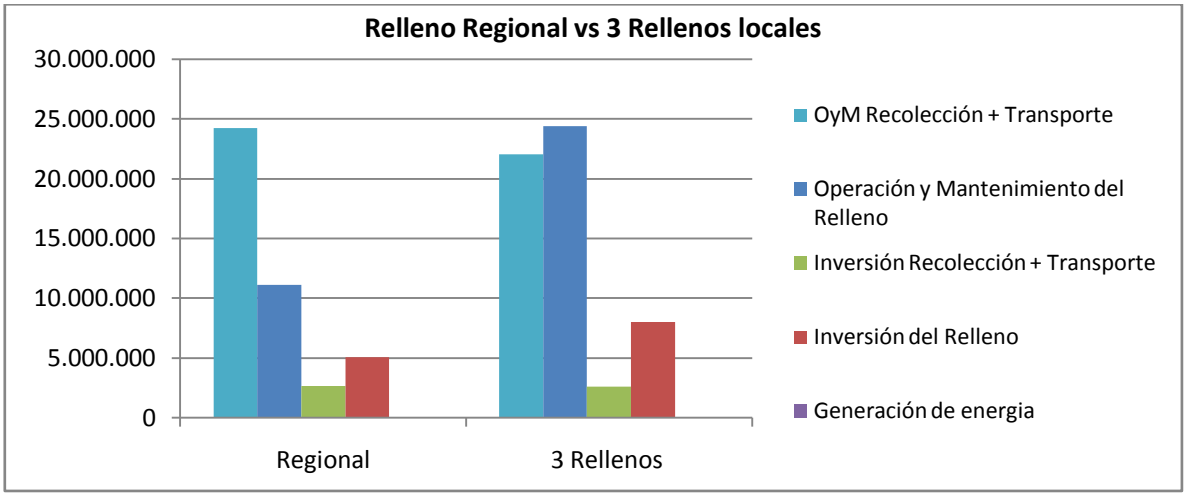


Gráfico 29.- VAN, Rellenos regional y locales

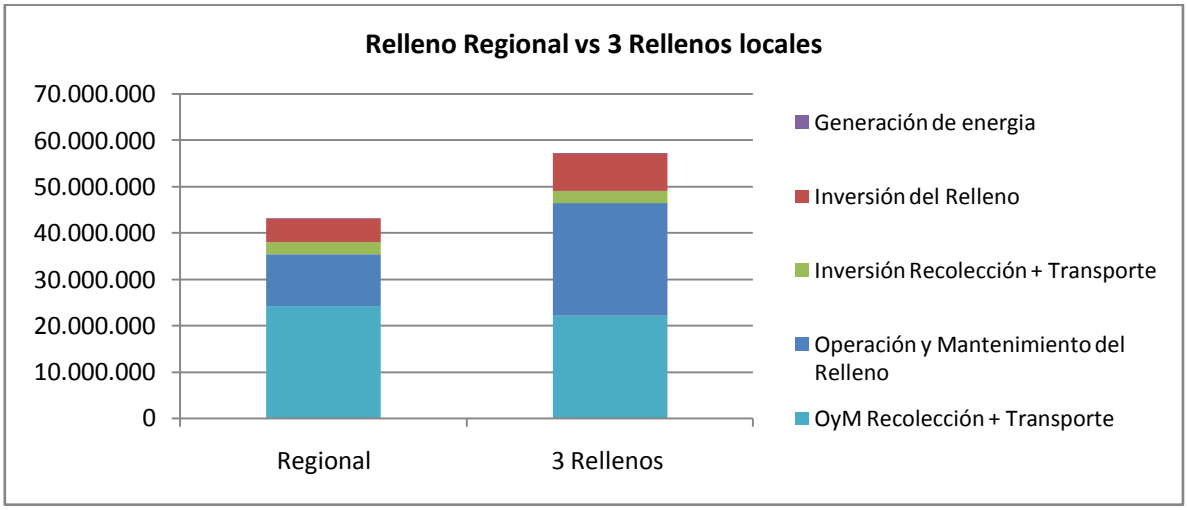


Gráfico 30.- VAN, Rellenos regional y locales

En la Tabla 46, se presentan los porcentajes que representan la recolección y transporte, disposición final y generación de energía dentro de los costos totales de la gestión de residuos.

	Dolores	Fray Bentos	Mercedes	Regional	3 Rellenos
% Recolección y transporte	46%	43%	41%	64%	43%
% Disposición final	54%	57%	59%	38%	57%
% Generación de Energía	-	-	-	0,7%	-

Tabla 46.- Porcentajes representativos

Se puede observar que la relación de la disposición final y la recolección y transporte es del orden del 50 %, destacándose que en los casos de los rellenos locales la disposición final representa un porcentaje mayor, mientras que en el caso del relleno regional ocurre lo contrario.

Este resultado era de esperarse, ya que el principal efecto de la regionalización es la reducción de los costos de disposición final, pero en contrapartida los costos de recolección y transporte se incrementan.

	Dolores	Fray Bentos	Mercedes	Regional	3 Rellenos
Balance (US$)	15.477.502	19.881.650	21.645.000	42.856.487	57.210.820
			Ahorro	**14.354.333**	**25%**

Tabla 47.- Costos totales

De los resultados obtenidos se desprende que la opción de un relleno regional logra un beneficio en la gestión de residuos de las tres localidades, que se traduce en un ahorro del 25 % del gasto destinado a la gestión de residuos, representando un total a lo largo de los años en funcionamiento de 14.354.333 US$.

En la Tabla 48, se presentan los valores obtenidos de tarifas de gestión integral de residuos sólidos urbanos (GIRSU), las cuales se expresan en dólares por toneladas y dólares por habitante por año.

Tarifa GIRSU					
	Dolores	Fray Bentos	Mercedes	Regional	3 Rellenos
(US$/ton)	165,4	150,3	95,4	89,1	127,4
(US$/hab/año)	42	40	25	23	33

Tabla 48.- Tarifas GIRSU

En lo que refiere a los resultados, el análisis de comparación de las alternativas regional y local se realizó desde el punto de vista económico, que sin lugar a dudas es un aspecto esencial para la toma de decisiones de los gobiernos departamentales.
Sin embargo, es necesario tener en cuenta y valorizar la influencia sobre otros aspectos como el ambiental y social, los cuales son difíciles de cuantificar o medir en términos monetarios ya que estamos hablando de aspectos intangibles y distantes entre sí.

El relleno regional logra una escala que permite la incorporación de una planta de generación de energía que, independientemente de los beneficios económicos que podría llegar a generar, tiene un fuerte valor ambiental, logrando por un lado generar energía a partir de una fuente renovable y presentándose como una solución a la emisión de gases contaminantes, en especial GEI, a la atmósfera.
Además, el relleno regional es una solución muy beneficiosa para las localidades pequeñas que no pueden afrontar grandes costos para disponer correctamente sus residuos.

A su vez, cabe destacar como un punto clave para éxito del proyecto, la importancia de poder lograr acuerdos políticos y trabajo en equipo entre las dos intendencias municipales involucradas, con el fin de desarrollar el proyecto y alcanzar el objetivo planteado.

5 Anteproyecto

5.1 Localización del predio para el caso de estudio

La selección del sitio para el desarrollo de un Relleno Sanitario debe ser analizada con detalle, incluyendo diversas variables que influyen a la hora de prevenir impactos negativos en el ambiente y la salud pública. Debido a que un RSa impacta directamente sobre el suelo, el aire y el agua, es de vital importancia analizar cuidadosamente las características de las posibles zonas para la implantación del SDF, seleccionando aquel que resulte más adecuado, técnicamente aceptable y permita minimizar los impactos negativos sobre los diversos medios.

En el año 2012 la consultora LKSur realizó un exhaustivo análisis de los posibles sitios en los cuales se podría desarrollar un Relleno Sanitario Regional, abarcando las ciudades de Mercedes, Dolores y Fray Bentos, ubicadas en los departamentos de Soriano y Río Negro. En el Tomo II – "Informe de Selección del Sitio para el nuevo Relleno Sanitario Regional del Residuos Sólidos" se detalla la metodología aplicada para la selección de dicho sitio. A su vez, en el Tomo VIII – "Estudios de Campo" se presenta toda la información recopilada y relevada de la zona de interés, empleada para determinar el nuevo sitio para el relleno regional.

Los criterios tenidos en cuenta por LKSur para la selección del sitio del RSa Regional toman como base los propuestos por DINAMA en la Propuesta Técnica para la Reglamentación (PTR): "Gestión Integral de Residuos Sólidos Industriales, Agroindustriales y de Servicios" y por la Agencia Ambiental de Estados Unidos (EPA) para la localización de Rellenos Sanitarios, ver Tabla 49.

Además de los criterios mencionados se definieron unos criterios de segundo nivel para seleccionar los predios más aptos. Por otra parte, se realizó un análisis para establecer un criterio de clasificación de predios en función de la distancia a cada una de las ciudades, ponderando por la generación de residuos correspondiente. Por último, se selecciono un predio por departamento y se procedió a verificar en campo la aptitud técnica para la localización del mismo, relevando aspectos ambientales, sociales y económicos que permitieron establecer un orden de aptitud a los predios.

Aspecto	Criterio de aptitud y exclusión
Urbanización	Excluir los terrenos ubicados a menos de 4 km de urbanizaciones
Humedales	Exclusión de los mismos y sus zonas de influencia
Aeropuertos	Excluir sitios a menos de 3000 m para aviones de turbina y a menos de 1500 m para aviones de hélice Disminuye la aptitud la existencia de aeródromos en el área de influencia
Zonas inundables	Excluir zonas inundables con una recurrencia de 100 años
Distancia "D" a cuerpos de agua	Debe ser D>800 m a cuerpos de agua permanentes medidos en condiciones de estiaje

	Debe ser D>100 m de la línea de costa de creciente con recurrencia mayor a 100 años, además la cota de fondo de la celda>2 m respecto a la cota de la creciente mencionada anteriormente Debe ser Dmin>5 km de una toma superficial de agua de potabilización
Zonas de recargas de acuíferos	Exclusión total de las mismas y zonas de influencia
Zonas de fallas y discontinuidades	Excluir de: • áreas que no posean barrera geológica natural para el emplazamiento. • áreas de fallas geológicas. • áreas de importante fisuración que contengan acuíferos y/o permitan un rápido pasaje de fluidos. • áreas donde el material geológico superficial y somero presente importante porosidad y conductividad
Profundidad admisible al nivel del agua subterránea	D>2 m sobre la base de las celdas y el nivel máx. freático referido al máx. anual
Tomas de agua subterráneas	D>5 km de tomas para poblaciones
Reservas ecológicas o áreas de especial protección	Excluir reservas y zonas de alta sensibilidad por su ecosistema
Presencia de viviendas en el entorno	Se recomienda mantener una distancia mínima de 400 m a la vivienda más cercana. A mayor cantidad de viviendas en el área de influencia del emprendimiento, menor aptitud para el mismo
Uso del suelo	Baja densidad de población y escasa tasa de crecimiento poblacional mejoran la aptitud del predio Baja productividad de suelos medida a través del índice de CONEAT mejora la aptitud del predio
Dirección y velocidad del viento	Disminuye la aptitud del predio si los centros poblados más cercanos se alinean con la dirección predominante de los vientos
Pendiente del terreno	Mejora la aptitud predios que tengan pendientes menores al 5%
Material geológico superficial	Mejora la aptitud la existencia de una barrera geológica natural. Disminuye sensiblemente la aptitud del predio la existencia de material geológico de gran permeabilidad ya sea primaria o por fisuración
Agua subterránea	Disminuye la aptitud si el agua subterránea es fuente de abastecimiento única o estratégica del área Disminuye la aptitud cuanto mayor es la productividad del acuífero Mejora la aptitud la profundidad a la que se encuentra el nivel de agua subterránea
Vías de circulación	Mejor aptitud si el predio cuenta con vías de circulación adecuadas para el tránsito de camiones
Zonas de interés turístico y cultural	Disminuye la aptitud del predio si el mismo se encuentra cercano a centros de interés social

	Disminuye la aptitud de los predios si estos se encuentran en la cuenca visual de las zonas de interés cultural o paisajístico del área
Distancia del predio a los principales centros de generación	Mejora la aptitud cuanto más próximo sea el predio a los centros de generación
Distancia "D" a edificios públicos	Excluir predios con D<3 km de escuelas rurales u otros edificios públicos con presencia de menores. La existencia de edificios públicos en el área de influencia disminuye la aptitud del sitio

Tabla 49.- Criterios de aptitud y exclusión

Luego de aplicados los criterios de exclusión presentados en la Tabla 49, se implementó un segundo nivel de criterios de exclusión, siendo estos:

- Predios con área mayor o igual a la requerida, de modo de negociar con un único propietario
- Predios con posibilidad de realizar vertido directo a un curso de agua, a los efectos de minimizar y simplificar las canalizaciones del efluente tratado
- Asegurar que el curso de agua tiene un caudal suficiente para soportar el aporte del vertido desde el vertedero en condiciones críticas. Esto quiere decir que para los valores de vertido se cumpla de forma estricta con la normativa
- Predios con acceso directo desde una ruta nacional, ruta secundaria o camino departamental.

Como conclusión, se determinó que el predio ubicado en el Padrón 8378 del departamento de Soriano, resultó ser el más adecuado para el establecimiento del RSa. Dicho padrón presenta las siguientes características:

Padrón 8379 – Dpto. Soriano	
Ubicación	Sobre ruta 21
Curso de agua más próximo	Las Maulas
Área (ha)	85
Distancia a centros poblados (km)	
Mercedes	16
Fray Bentos	50
Dolores	19

Tabla 50.- Descripción padrón seleccionado

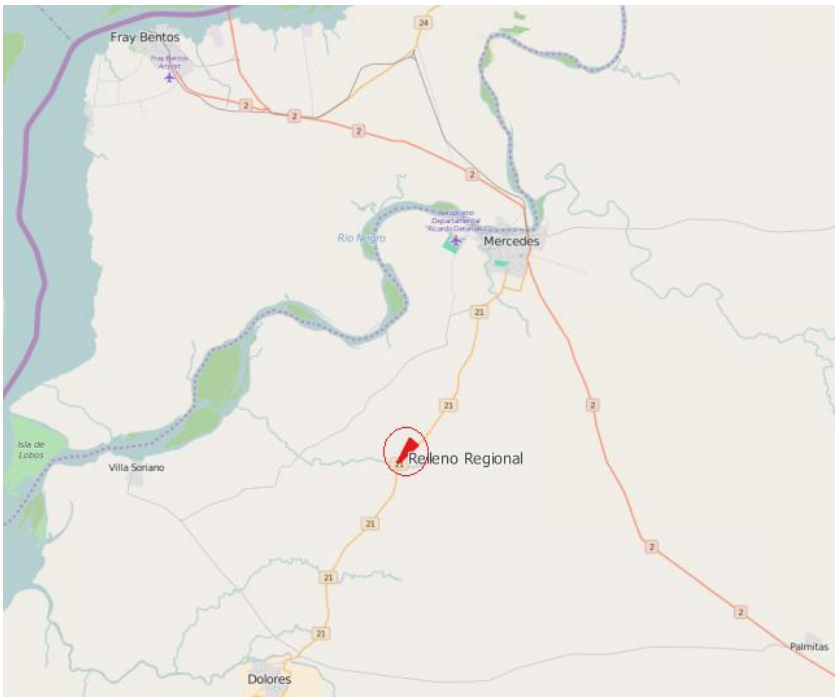


Figura 18.- Localización del predio



Figura 19.- Localización del predio

5.2 Características del predio seleccionado

5.2.1 Parámetros determinados para el predio seleccionado

La consultora LKSur realizó diversos estudios de campo para el sitio seleccionado, con el objetivo de conocer con mayor detalle las características geológicas, hidrológicas y morfológicas de la zona de estudio. En particular se realizaron cuatro cateos en el predio y mediciones en diferentes perforaciones en el entorno del área de interés.

Se tomaron mediciones del nivel estático en los distintos pozos y conociendo la cota de terreno en cada pozo se determinó el nivel freático, en la Tabla 51 se presentan los valores relevados.

ID	Coordenada X	Coordenada Y	Cota Z (Cero Oficial)	Nivel estático (m)	Nivel freático (m)
1	397.623	6.306.874	61.89	-	-
2	396.942	6.305.692	42.47	31.97	10.5
3	396.618	6.305.991	38.71	30.51	8.2
4	397.065	6.306.373	51.17	35.57	15.6
5	396.079	6.304.710	17.2	17.2	0
6	396.015	6.304.710	16.69	16.69	0
7	395.859	6.302.763	44.84	34.29	10.55
8	394.698	6.301.284	42.93	32.01	10.92
9	397.220	6.300.593	60.7	44.54	16.16
10	397.594	6.300.669	61.64	43.9	17.74
11	401.070	6.308.247	75.4	44.16	31.24

Tabla 51.- Niveles freáticos

A partir del nivel freático en cada pozo se determinaron las líneas piezométricas para el área de estudio, ver Figura 20.

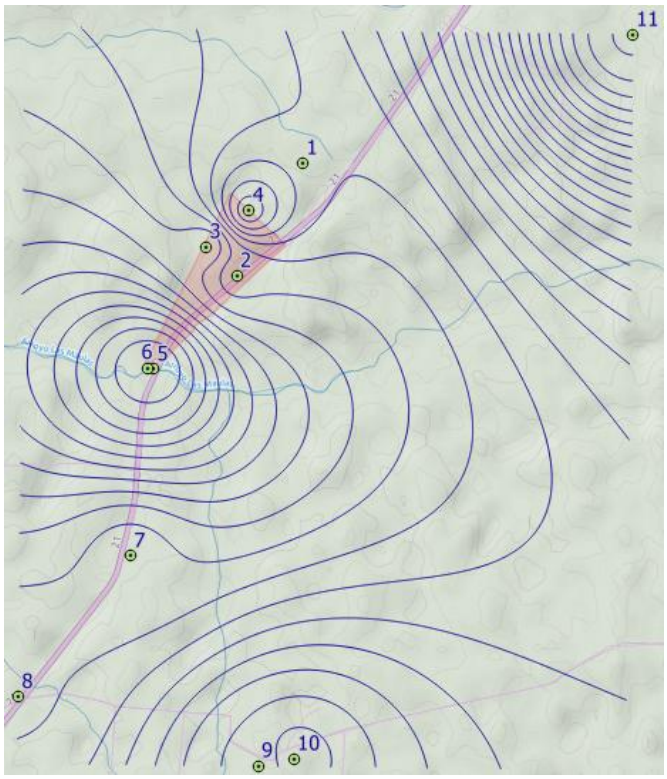


Figura 20.- Curvas piezométricas

Para el curso de agua cercano a la zona de estudio, el arroyo Las Maulas, se realizaron mediciones determinando parámetros de campo en el curso:

Parámetros de campo – Arroyo Las Maulas	
Temperatura (°C)	16,9
pH	7,97
Caudal (L/s)	274

5.2.2 Determinación del área útil

A partir de los criterios presentados por la DINAMA y la EPA se determinó el área útil del predio para la conformación de módulos que contengan los residuos a disponer. Se utilizó un Sistema de Información Geográfica para dicha delimitación, empleando principalmente la herramienta "*Buffer".*

Se consideró que al área disponible para la colocación de residuos debe encontrarse a:

- 200 m de la Ruta 21
- 800 m del curso de agua permanente, en este caso el Arroyo Las Maulas
- 100 m de los límites de predios linderos
- Zona alta del predio

Con lo cual se obtuvo que el área efectivamente aprovechable abarca 24 ha, como se muestra en la Figura 21.

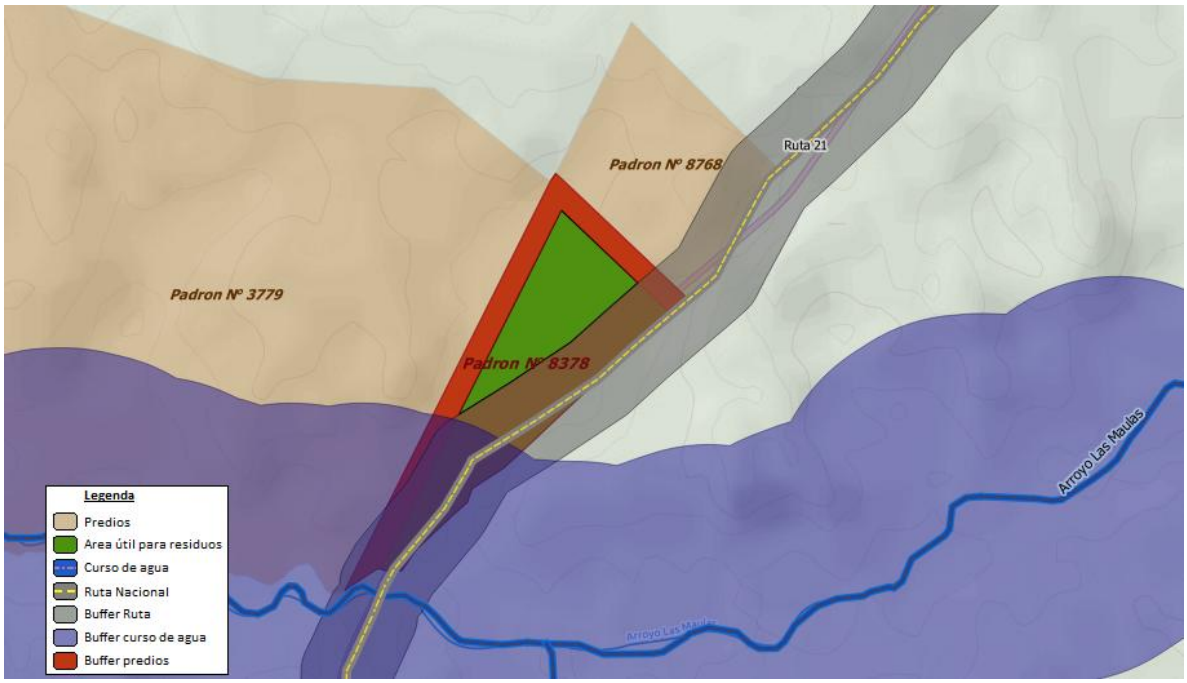


Figura 21.- Área aprovechable del predio

5.3 Vida útil

El relleno es proyectado para abarcar un horizonte de al menos de 20 años, comenzando su operación en el año 2016.

Teniendo en cuenta los criterios de exclusión, la planicie de inundación para 100 años de periodo de retorno por la cañada que atraviesa el predio y el monte nativo existente en la zona, el área útil para la disposición de los residuos dentro del predio abarca aproximadamente 20 ha.

Por otro lado, el total de residuos a disponer en los 20 años previstos es de aproximadamente 482.100 toneladas, y considerando que la densidad de los residuos compactados es de 700 kg/m^3, se obtiene un volumen total de 688.700 metros cúbicos. Si se asume una altura promedio de 8 metros para la conformación de los módulos, es necesaria un área de al menos 8,6 ha.

Se considera razonable prever el diseño del RSa para 20 años, ya que dentro de las 20 ha disponibles se debe incluir también la caminería interna, la planta de tratamiento, la planta de generación de energía eléctrica, las oficinas y vestuarios, entre otros.

De todas formas se dispone de área suficiente entre los módulos para continuar explotando el sitio para años futuros. Para ello se realizó la impermeabilización del suelo por debajo de la cominería, ya que el área disponible entre módulos, una vez clausurados los mismos, permite continuar con la disposición de residuos para aproximadamente 10 años más.

5.4 Población servida y RS a disponer

El diseño del RSa Regional se ha previsto para recibir los RSU generados por las ciudades de Dolores, Mercedes y Fray Bentos.

Debido a que no es posible determinar una tasa de crecimiento fija a lo largo de los años, ya que las tres localidades presentan tasas de crecimiento diferentes (ver Sección 4.2.1.1), para evaluar el crecimiento poblacional anual en el Relleno Regional se utilizó la tasa de crecimiento asociada a una población de 80.000 habitantes, determinada en la Sección X de la Memoria de Calculo.

Si bien se sabe que al emplear la tasa correspondiente a una población de 80.000 habitantes se sobreestima la determinación de residuos a ingresar por año al relleno, se considera que al utilizar dicha tasa de crecimiento poblacional se está del lado de la seguridad.

Por otro lado, la tasa de generación de residuos del relleno regional se calculó como el promedio ponderado por la población de las tasas asociadas a cada localidad en función de la población, como se presenta en la Sección 4.5.1.1 de la Memoria Justificativa.

Por lo tanto, los datos empleados para estimar la población y los residuos ingresados al RSa Regional anualmente son:

- *Tasa de crecimiento poblacional anual = 1,007*
- *Tasa de generación de residuos = 0,72 kg/hab.día*

En la Tabla 52 se presentan los valores obtenidos anualmente.

Año	Población	Total Residuos (ton/año)
2016	86.305	22.649
2017	86.866	22.797
2018	87.431	22.945
2019	87.999	23.094
2020	88.571	23.244
2021	89.147	23.395
2022	89.726	23.547
2023	90.309	23.700
2024	90.896	23.854
2025	91.487	24.009
2026	92.082	24.165
2027	92.680	24.323
2028	93.283	24.481
2029	93.889	24.640
2030	94.499	24.800
2031	95.114	24.961
2032	95.732	25.123
2033	96.354	25.287
2034	96.980	25.451
2035	97.611	25.616

Tabla 52.- Población y Residuos a disponer anualmente

5.5 Explotación del RSa

5.5.1 Ubicación de los módulos

Como fue explicado en la Sección 3 de la Memoria Descriptiva (forma de explotación del RSa), la forma de disponer los residuos será a través de cuatro módulos excavados con planta cuadrada. Con el fin de ubicar dichos módulos, se tuvieron en cuenta las curvas de nivel[13], para determinar la zona más alta del predio, la cual se encuentra en la cabecera del mismo (zona Noreste).

Luego se determinó la planicie de inundación de la cañada que atraviesa el predio para un evento de 100 años de período de retorno. Debido a que no se contaba con datos relevados de la sección transversal de dicha cañada, se supuso una sección trapezoidal.

[13] Curvas de nivel cada 5 metros obtenidas de la web de Infraestructura de Datos Espaciales, para el departamento de Soriano (descarga-cdp-ide.agesic.gub.uy/CONJUNTO%20DE%20DATOS%20PROVISORIOS/VECTORIAL/Soriano/)

Como resultado se obtuvo la planicie de la Figura 22, de la cual se puede observar que al alcance de la misma dentro del predio no afecta la parte superior del área disponible para la colocación de los residuos siendo ésta, como ya fue mencionado, la zona más elevada. Además, se excluyó del área aprovechable del predio, el monte nativo existente de la zona, el cual permanecerá intacto, pero de todas maneras se cuenta con una extensa área para la construcción de los módulos.

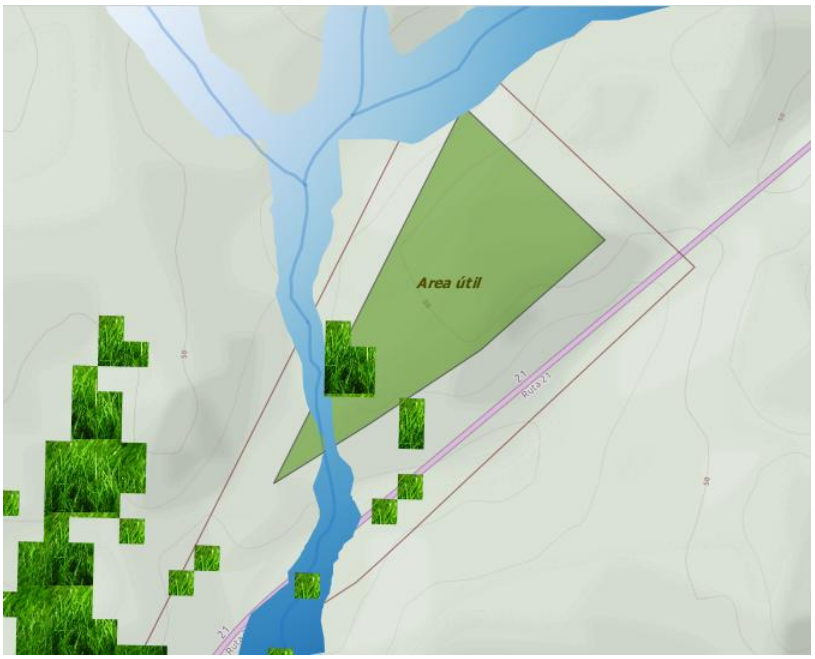
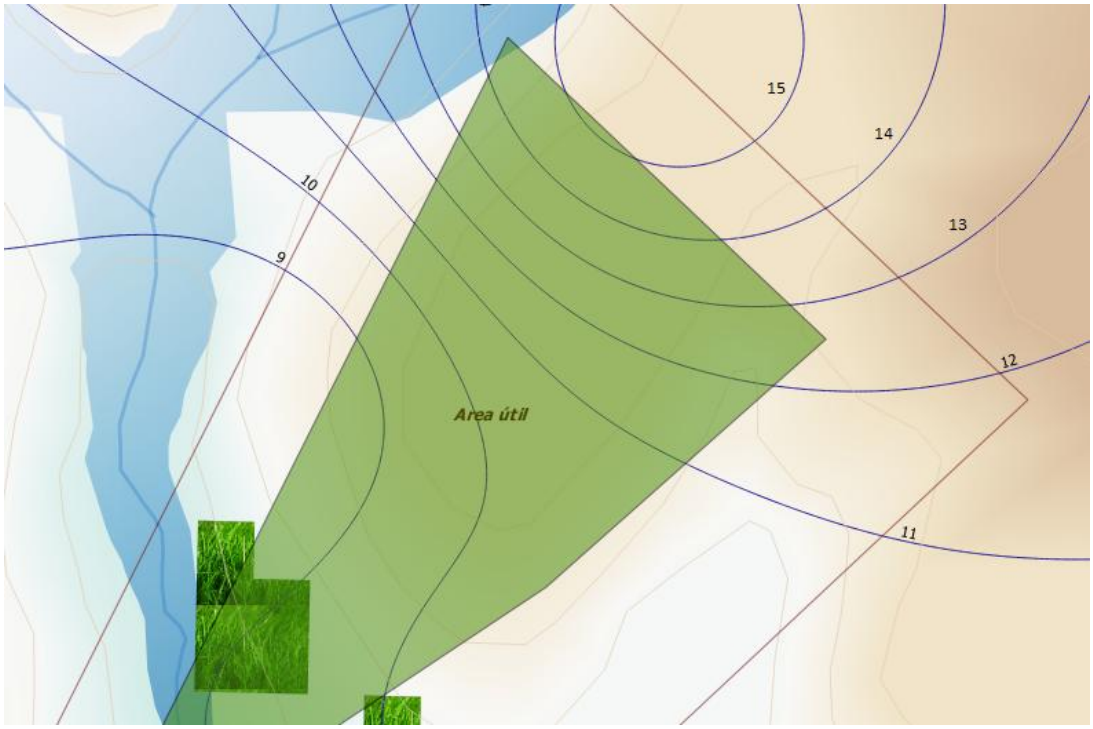


Figura 22.- Planicie de inundación

Luego, para la zona definida como apta para la disposición de los residuos y siguiendo las curvas piezométricas determinadas previamente, se verificó que la distancia mínima entre la base de los módulos fuera de 2 metros, como se especifica en los criterios de exclusión presentados en la Tabla 49, sabiendo que la profundidad de excavación para cada uno de los módulos es de 1,8 m.



5.5.2 Método de vertido y conformación de módulos

5.6 Calculo del lixiviado

Los dos factores característicos de un efluente son el caudal y su composición, los que para el caso de lixiviados resultan estar íntimamente relacionados. El caudal depende principalmente de las precipitaciones de la zona, el escurrimiento superficial, la infiltración a través del material de cobertura y la evapotranspiración. A su vez, la producción de lixiviado es influenciada por la naturaleza de los residuos, principalmente la humedad inicial de los mismos, y su nivel de compactación.

En cuanto a la calidad del efluente dentro de los factores que afectan se destaca la edad del relleno, la variación estacional de las precipitaciones, tipo y composición de los residuos y sobre todo la edad de los residuos depositados.

El potencial de formación de lixiviado puede valorarse mediante el cálculo de un balance hidrológico en el sitio de disposición final, el cual implica considerar la suma de todas las cantidades de agua que entran en el SDF (precipitaciones, humedad de los residuos y del material de cobertura) y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad de agua que sale como vapor de agua. La cantidad potencial de lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la cantidad de retención de humedad de los residuos sólidos dispuestos.

5.6.1 Determinación del caudal de lixiviado

Como se explicó en la Sección 4 de la Memoria de Calculo (Tomo2), se realizo un balance anual de agua en la masa de residuos y material de cobertura depositados por nivel, con el fin de determinar el caudal de lixiviado, siguiendo la metodología presentada en bibliografía [2]. Luego el balance se realizó de forma mensual tomando las precauciones y modificaciones correspondientes.

En la Figura 23 se presenta un esquema de las componentes presentes en el balance de aguas.

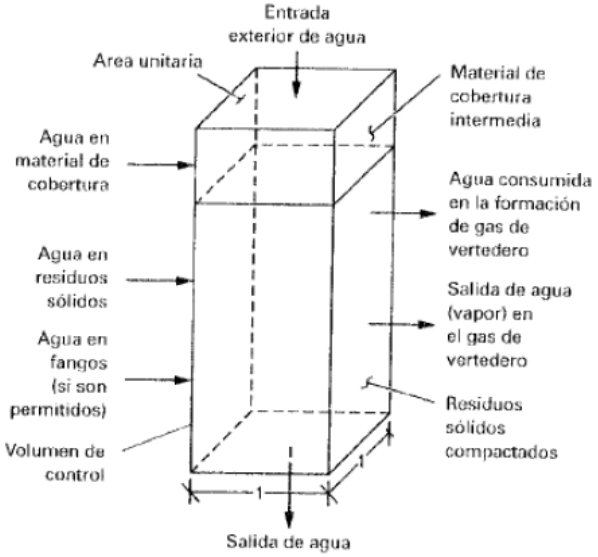


Figura 23.- Esquema del balance hidrológico en la masa de residuos

A continuación se describen brevemente los términos presentes en el balance:

Agua que ingresa a través de la cobertura

Es la componente del balance hidráulico que consta principalmente de la precipitación que percola a través de la cobertura

Agua contenida en los residuos

La humedad que ingresa con los residuos es el agua inherente a los mismos. La misma depende del clima, condiciones de almacenamiento y transporte de residuos así como características socioeconómicas de la población generadora de los mismos

Agua contenida en el material de cobertura

La humedad que ingresa con el material de cobertura depende del tipo y la fuente de material así como de las condiciones climáticas. La cantidad de agua máxima contenida en el material de cobertura se determina por la capacidad de campo del material.

Agua consumida en la formación del gas del Relleno

La descomposición de la fracción orgánica de los residuos utiliza cierta cantidad de agua. Este consumo dependerá de las características de los residuos así como su edad.

Agua perdida en forma de vapor en el gas del Relleno

El gas del relleno estará saturado en agua en general. La cantidad de agua perdida se estima a través de la ley de los gases perfectos

Capacidad de campo en el relleno

El agua que ingresa al relleno y no se utiliza en las reacciones ni sale como vapor de agua con el gas del relleno tiene dos destinos: mantenerse dentro o lixiviar. Los materiales que forman parte de la cobertura, así como los residuos sólidos del relleno sanitario tienen su propia capacidad de campo, la cual puede almacenar humedad y mantenerla hasta que llegue al nivel de saturación. La cantidad potencial de lixiviado a generarse es la cantidad de agua que excede de la capacidad de campo. Dicha capacidad varía en función del peso de la sobrecarga.

Con el fin de representar en el balance de lixiviado la variabilidad de los eventos de lluvia, se optó por emplear una serie de precipitación diaria histórica real de la zona, obtenida de la estación meteorológica “Mercedes”. Se realizó un análisis de dicha serie para seleccionar 20 años continuos que reúnan eventos de diferente magnitud y periodo de retorno, ver Sección XX de la Memoria de Calculo, finalmente se optó por considerar los datos entre los años 1983 al 2002.

5.6.1.1 Resultados obtenidos

A continuación se presenta la serie de valores obtenidos de la producción de lixiviado anual realizando el balance con los valores medios de precipitación anual de la serie histórica seleccionada, el desarrollo se detalla en la Sección 4 de la Memoria de Cálculo.

Percentil	Caudal Lixiviado (m^3/año)
100	17.844
90	11.174
80	9.636
70	7.256
60	5.628
50	3.471
40	0
30	0
20	0
10	0
0	0

Tabla 53.- Percentiles de la serie de lixiviado anual, con lluvias

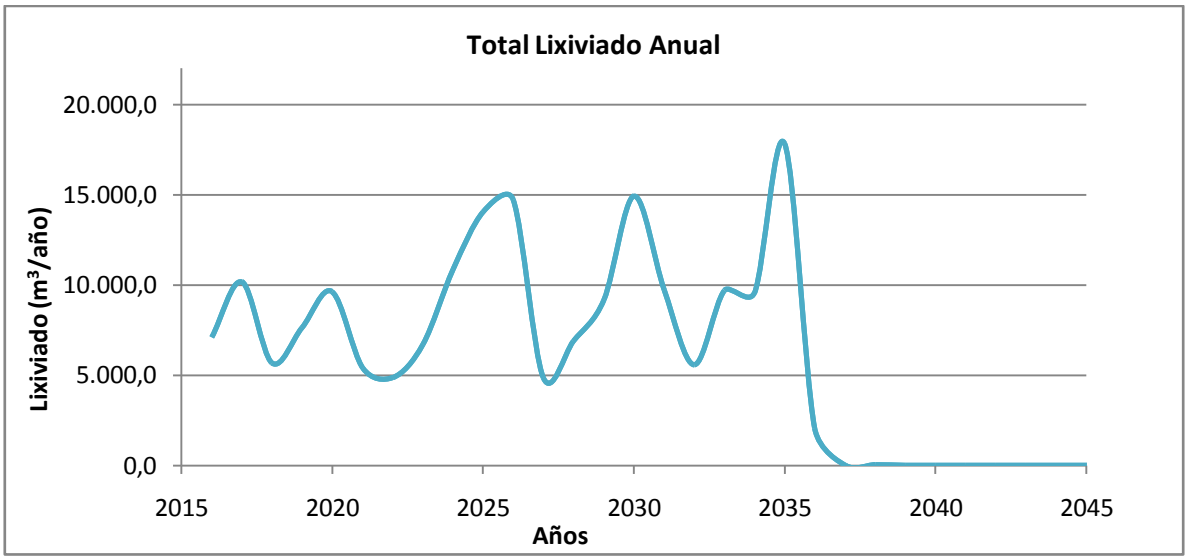


Gráfico 31.-Serie de la generación lixiviado anual, con lluvia

Los resultados obtenidos de la producción mensual de lixiviado, en este caso aplicando la serie de precipitación media mensual, fueron los siguientes:

Percentil	Caudal lixiviado (m^3/mes)
100	5.775,4
90	1.182,9
80	753,2
70	577,5
60	486,3
50	342,7
40	275,2
30	4,0
20	0,1
10	0,0
0	0,0

Tabla 54.- Percentiles de la serie de lixiviado mensual, con lluvias

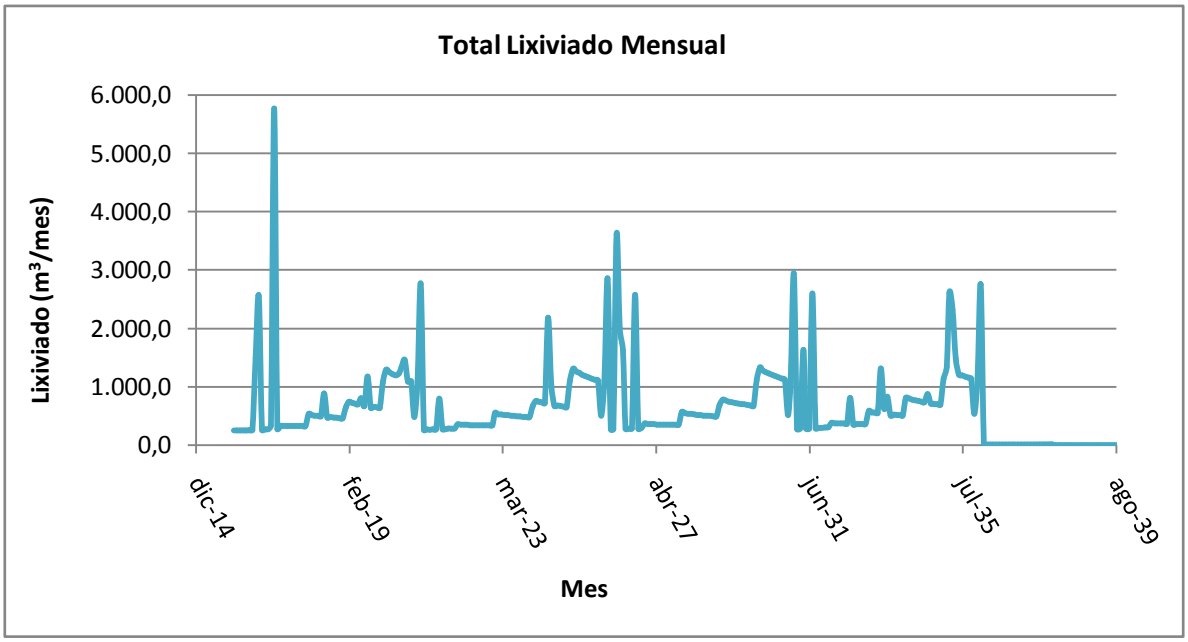


Gráfico 32.- Serie de la generación lixiviado mensual, con lluvia

En la Sección 0, se presentan los resultados obtenidos del balance mensual en tiempo seco, es decir eliminando del balance hidrológico los valores de precipitación media mensual.

5.7 Tratamiento de lixiviado

5.7.1 Caracterización del efluente

5.7.1.1 Materia orgánica

El proceso de degradación y estabilización de los RS que tiene lugar en el relleno sanitario, ocurre en varias fases, descriptas en la Sección 2.4.5 de la Memoria Estudios Básicos:

- Fase I: Ajuste inicial
- Fase II: Fase de transición
- Fase III: Fase ácida
- Fase IV: Fase de fermentación del metano
- Fase V: Fase de maduración

La composición del lixiviado presenta grandes variaciones en función de la fase en que se encuentre. Además existen otros factores que inciden como ser el tipo de residuos que se dispongan, condiciones climáticas y forma de operación del relleno, entre otras.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que el lixiviado generado en determinado momento está compuesto por líquido en varias fases de descomposición, ya que proviene de residuos dispuestos en diferentes módulos y niveles que tienen distintas edades.

Con el fin de adoptar parámetros representativos para diseñar la planta de tratamiento, se analizarán las series de mediciones, en tiempo seco del lixiviado generado en los RSa de Las Rosas y Felipe Cardozo. Los datos fueron aportados por las Intendencias de Maldonado y Montevideo, caso en el que también se cuenta con las mediciones realizadas por la empresa ESPINA.

Las Rosas

A continuación se presenta la serie de concentraciones de DBO_5 y DQO del relleno de Las Rosas medidas previo a la entrada del sistema de tratamiento:

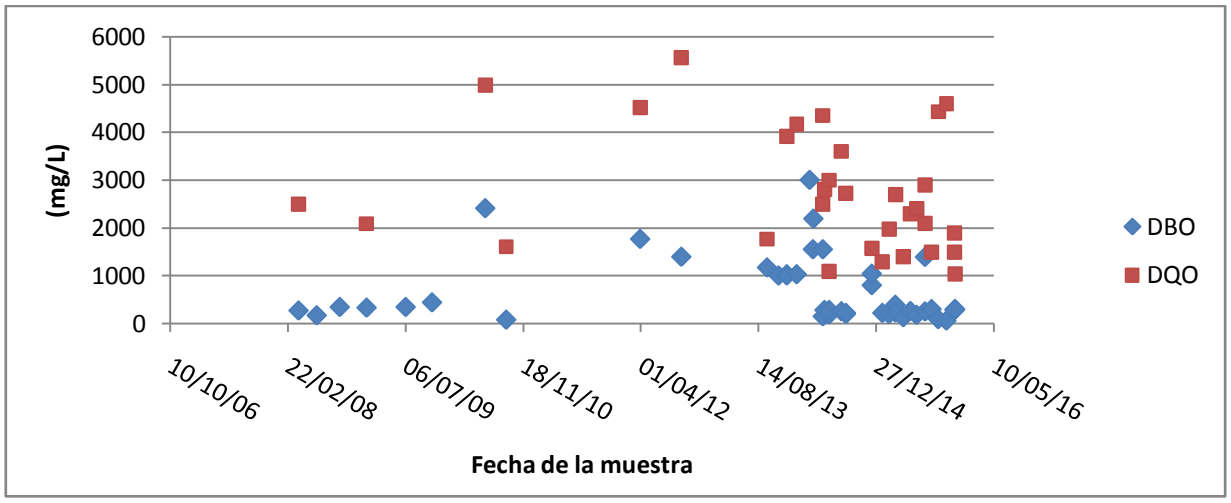


Gráfico 33.- Serie de datos DBO_5, Las Rosas

Felipe Cardoso

En el momento de la toma de muestra para las mediciones, el RSa de Felipe Cardoso era gestionado como un vertedero controlado, las Usinas 5, 6 y 7 se encontraban clausuradas, mientras que la Usina 8 presentaba las celdas A y B con su capacidad colmada con cobertura parcial y la celda C en actividad. Los datos presentados a continuación corresponden a la Usina 8, celdas A, B y C.

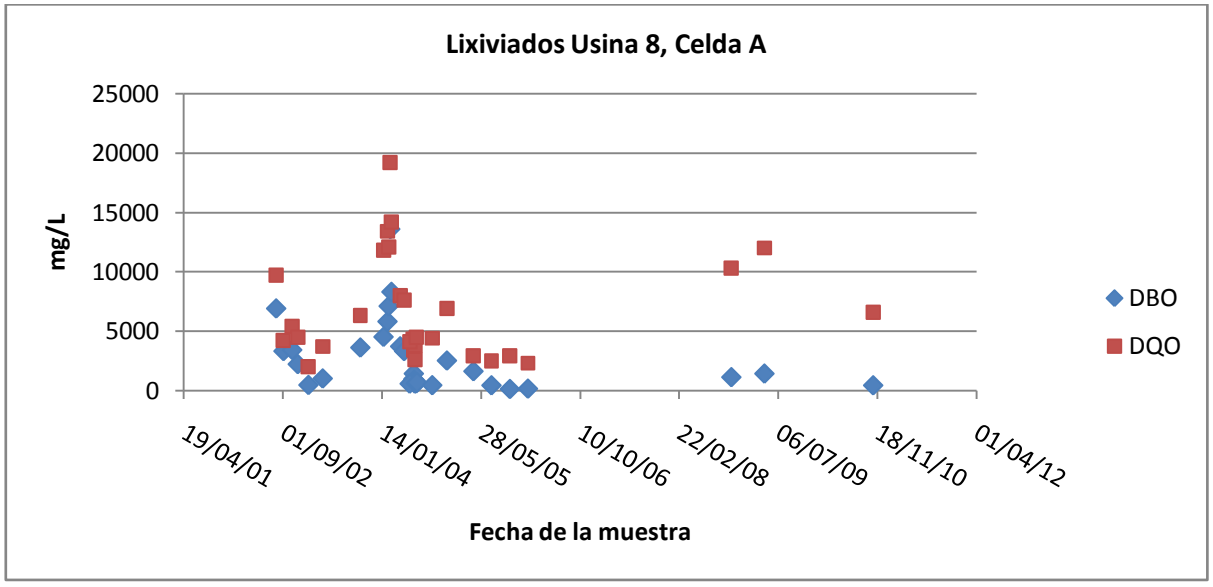


Gráfico 34.- Serie de datos DBO_5, Felipe Cardoso Usina 8, celda A

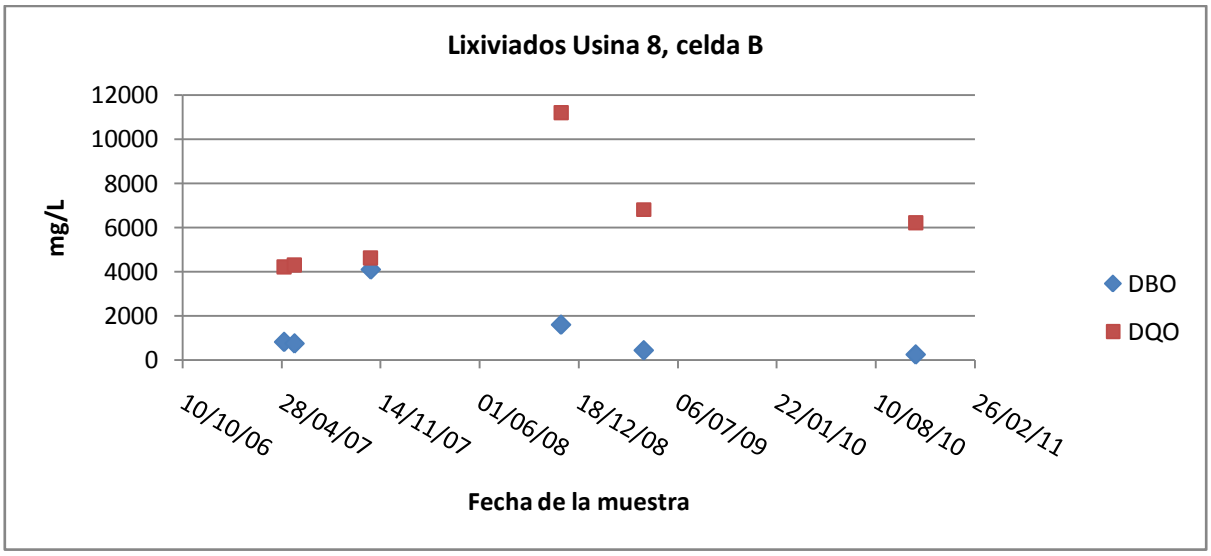


Gráfico 35.- Serie de datos DBO5, Felipe Cardoso Usina 8, celda B

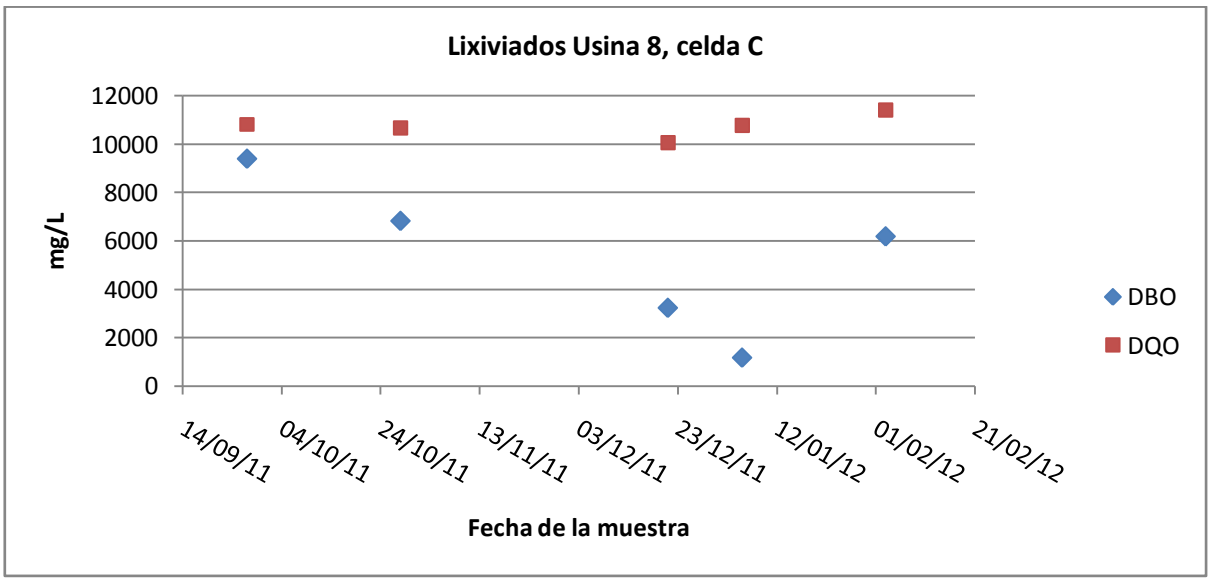


Gráfico 36.- Serie de datos Felipe Cardoso, Usina 8 celda C

Análisis de los datos

A continuación se presentan los percentiles 90, 50 y 10, los máximos, mínimos y promedios asociados a las diferentes series de datos:

Rango	DBO_5 (mg/l)			
	Las Rosas	Felipe Cardoso		
		Celda A	Celda B	Celda C
Percentil 90	1560	6790	2850	8362
Percentil 50	305	1250	785	6180
Percentil 10	166	411	345	1993
Máximo	3010	13600	4100	9390
Mínimo	70	100	250	1170
Promedio	676	2571	1327	5358
Número de datos	44	32	6	4

Tabla 55.- Percentiles, series de datos

Se observa que los valores de concentraciones medidas en el relleno de Las Rosas, son significativamente menores a los valores de las celdas A, B y C de Felipe Cardoso.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que los valores de concentraciones de la serie de Las Rosas consideran el lixiviado total generado en el RSa. Por lo tanto las altas concentraciones presentes por los residuos en descomposición, que se encuentran en las fases II y III, pueden verse diluidos de cierta manera en el lixiviado total, generado por residuos más antiguos que se encuentren, por ejemplo, en las fases IV y V.

A su vez, Las Rosas es un RSa de características similares al relleno proyectado, no sólo por su escala sino también porque recibe únicamente residuos domiciliarios. A Felipe Cardoso ingresan diversos tipos de residuos, como ser los industriales que presentan grandes diferencias en sus características y por lo tanto impactan sobre el lixiviado. Además a la fecha de la toma de muestras era gestionado como un vertedero con algún grado de control, pero no como RSa propiamente.

Sumado a esto, el caudal de lixiviado generado en tiempo seco en Las Rosas, según fuentes de la Intendencia de Maldonado es de entre 20 y 40 m^3/d, presentando una gran similitud con los caudales en tiempo seco obtenidos para nuestro relleno regional.

Por lo tanto, para poder representar las variaciones de concentración en el diseño del sistema de tratamiento en tiempo seco, se considerarán tres rangos de valores, para los cuales se adoptaron valores algo mayores a los presentados en el relleno de Las Rosas, para estar del lado de la seguridad teniendo en cuenta los altos valores que se presentan en Felipe Cardoso.

En la tabla se presentan los valores considerados para el diseño:

Concentraciones de diseño	
DBO_5 min. (mg/L)	800
DBO_5 med. (mg/L)	2.500
DBO_5máx. (mg/L)	5.000

Tabla 56.- Concentraciones de diseño

Dilución en eventos de lluvia

Los eventos de lluvia tienen una gran influencia sobre el caudal de lixiviado, pudiendo distinguirse dos componentes: el caudal base, generado a partir de la humedad propia de los residuos y el caudal de lixiviado asociado a la lluvia, originado por la infiltración de la precipitación por la cobertura.

Cuando se da un evento de lluvia puede pensarse que la concentración de DBO_5 del caudal base es diluida en el caudal de lluvia, presentando un caudal de lixiviado mayor, pero menores concentraciones respecto a las de tiempo seco.

Con el fin de cuantificar el efecto de la dilución, se calculó por un lado, la serie de caudales base, realizando el balance de lixiviado sin precipitaciones asociadas, y por otro, la serie de caudales de lluvia asociados a las serie de precipitación seleccionada, como el caudal de lixiviado total menos el caudal base.

La serie de caudales base, como se puede observar en el Gráfico 37, no es constante, sino que depende de la etapa de operación del relleno, aumentando progresivamente a media que se colocan nuevos niveles y presentando un pico luego del último año de funcionamiento, debido a la colocación de la cobertura final cuyo peso sobre la masa de residuos ocasiona un aumento brusco en el caudal de lixiviado.

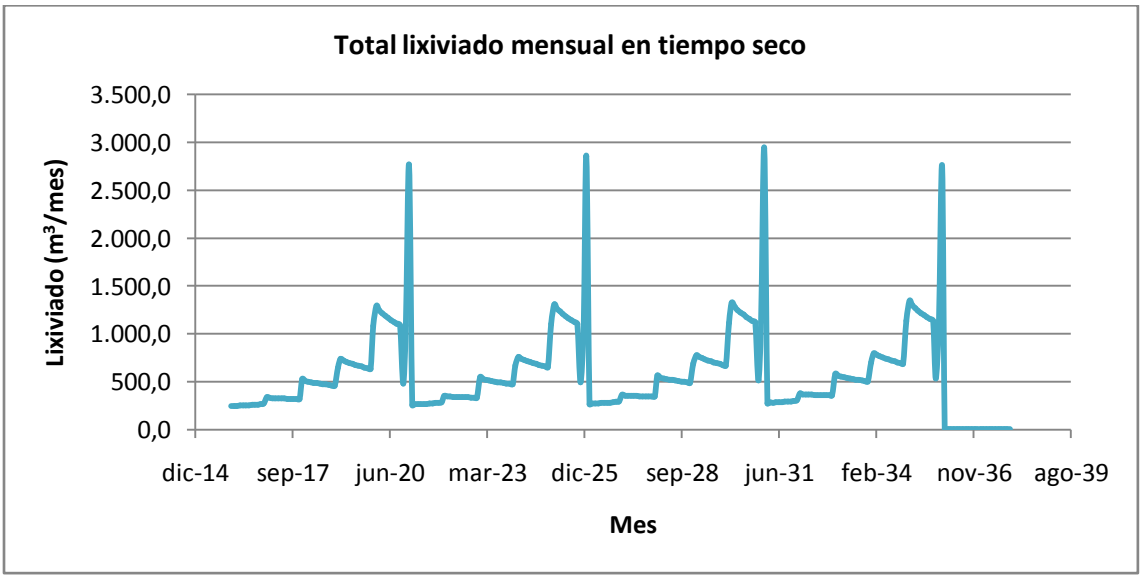


Gráfico 37.- Serie de caudales base

Percentil	Caudal lixiviado base (m^3/mes)
100	2.940
95	1.249
90	1.174
80	774
70	695
60	547
50	503
40	367
30	342
20	291
10	267
0	0

Tabla 57.- Percentiles de la serie de lixiviado mensual, en tiempo seco

Las concentraciones asociadas a cada situación también son diferentes, como se vio en la Sección 5.7.1, dependiendo principalmente de la fase de la descomposición en la que nos encontremos.

La concentración de DBO máxima se da en las fases II y III, es decir al inicio de la degradación de los residuos por lo tanto se le asignó el caudal mínimo, correspondiente al percentil 10 de la serie de caudales base. Luego, a medida que se van depositando los siguientes niveles comienza a aumentar el caudal de lixiviado generado y a darse una mezcla en las concentraciones asociadas a cada nivel donde van a estar dándose diferentes situaciones de degradación. Debido a esto, a la concentración media se le asignó el caudal medio, correspondiente al percentil 50 de la serie de caudales base y a la concentración mínima el caudal máximo, percentil 90.

Tiempo seco		
	Caudal (m^3/d)	Concentraciones DBO_5 (mg/L)
Mínimo	8,9	5.000
Medio	16,8	2.500
Máximo	39,1	800

Tabla 58.- Caudales y concentraciones de diseño

A partir de estos datos y siguiendo el procedimiento detallado en la Sección XX de la Memoria de Cálculo, se calculó la concentración diluida asociada a la serie de caudales totales de lixiviado.

La mínima concentración obtenida para la serie de precipitaciones considerada, fue de 287 mgDBO/L, asociada a una lluvia de 757,5 mm/mes que se da en Febrero del 2017 (segundo año de operación del módulo 1), correspondiente al año 1984 de la serie histórica seleccionada. Por lo tanto, para los eventos presentes en la serie considerada no es posible realizar el vertido directo al curso de agua.

De todas maneras, el caso hipotético más favorable para poder realizar el vertido directo es que el evento de lluvia tenga lugar el primer año de actividad de los módulos, caso en el que nos

encontramos por debajo del nivel del terreno y por lo tanto no se considera el escurrimiento, captándose toda la lluvia que cae sobre el módulo.

Considerando que el evento anterior de P=757,5 mm/mes se da en el primer año de actividad de los módulos y en particular en el mes de Junio (mes de menor evapotranspiración), se obtiene una concentración de 70 mgDBO/L. Si bien esta concentración es baja, no logra cumplir con lo exigido por el Decreto 253/79 que establece como límite una concentración de 60 mgDBO/L. Se calculó entonces, la precipitación que en este caso hace que la concentración del lixiviado sea 60 mgDBO/L y se obtuvo: P=870mg/L.

La probabilidad de que un evento de tal magnitud tenga lugar durante el primer año de actividad de los módulos, es baja. Se concluye entonces que el vertido directo al cuerpo de agua, no es una opción viable.

5.7.1.2 Nitrógeno

Para determinar la concentración de nitrógeno presente en el lixiviado se cuentan con los datos de Felipe Cardoso y Las Rosas. Sin embargo, los datos de Felipe Cardoso solo presentan valores medidos de Amoniaco (NH_3), mientras que para Las Rosas se cuentan con datos de Nitrógeno total, entre otros, y además se conocen los valores de salida de la planta de tratamiento para el Nitrógeno total.

Se sabe por experiencias en sistemas de tratamiento con lagunas anaerobias y facultativas que existe remoción de nitrógeno, en particular de amonio, en el total del sistema. Experimentos detallan que se han alcanzado incluso eficiencias del orden de 80 a 85% (Prosab, 2009). Además se conoces ecuaciones que permiten determinar la concentración de nitrógeno de salida en una laguna facultativa, en función de las características de la misma (tipo de flujo, tiempo de retención, temperatura del líquido, pH, etc), sin embargo estas ecuaciones son deducidas para efluentes domésticos.

Por otro lado, no se cuenta con demasiada información en cuanto al funcionamiento del sistema para lixiviado.

Por lo tanto, debido a las razones mencionadas anteriormente y los valores de entrada y salida de nitrógeno de la planta de tratamiento del RSa Las Rosas (y por lo tanto su eficiencia en remoción), se optó por emplear los valores de concentraciones en el lixiviado provenientes de dicha serie de dato. Se seleccionaron los percentiles 90, 50 y 10, los cuales fueron asociados a los caudales de diseño en tiempo seco presentados previamente. En la Tabla 59 se presentando los valores de la serie por percentil.

Percentiles	Nitrógeno Total (mg/l)
90	1899
80	1204
70	1052
60	932
50	654
40	600
30	510
20	404
10	231
0	58

Tabla 59.- Serie de concentraciones de Nitrógeno Total de Las Rosas por percentil

A su vez, a partir de la eficiencia en remoción de nitrógeno determinada para el sistema total, se asignó una eficiencia de remoción correspondiente a cada percentil. Se observó que las mayores eficiencias en remoción se obtenían cuando la concentración de nitrógeno a la entrada de la planta era elevada en comparación con las bajas concentraciones de entrada, para las cuales se obtenían eficiencias en remoción menores. De todas formas la eficiencia media de todo el sistema en Las Rosas es del orden del 67%.

De todas formas a los percentiles seleccionados de la serie de concentraciones de nitrógeno total se le asignó una eficiencia de remoción, según los rangos definidos y el siguiente razonamiento:

$$Si\ [Nt]_i \geq [Nt]_{lim\ ,sup} \rightarrow Eficiencia_i{}^{90}$$

$$Si\ [Nt]_{lim\ ,inf} < [Nt]_i < [Nt]_{lim\ ,sup} \rightarrow Eficiencia_i{}^{50}$$

$$Si\ [Nt]_i \leq [Nt]_{lim\ ,inf} \rightarrow Eficiencia_i{}^{10}$$

Siendo:

$$[Nt]_{lim\ ,inf} = \frac{[Nt]_{máx,90} + [Nt]_{med\ ,50}}{2} = 442{,}5\ mg/L$$

$$[Nt]_{lim\ ,sup} = \frac{[Nt]_{med\ ,50} + [Nt]_{mín,10}}{2} = 1276{,}5\ mg/L$$

Luego se determinó la eficiencia promedio de cada percentil y asignada correspondientemente. En la Tabla 60 se presentan los resultados.

Concentraciones de diseño			
Percentil	90	50	10
Nitrógeno total (mg/L)	1899	654	231
Eficiencia de remoción (%)	82%	73%	61%

Tabla 60.- Concentraciones de diseño y eficiencias en remoción, Nitrógeno Total

5.7.1.3 Otros componentes

Existen otros componentes presentes en el lixiviado cuyo control es importante, ya que una variación puede afectar el proceso biológico dentro de las lagunas o pueden ser contaminantes para el medio.

Por ejemplo, se recomienda que el pH este comprendido entre 6 y 8, para promover el desarrollo de las bacterias, en particular las metanogénicas (encargadas de la metalogénesis en la descomposición anaerobia de la M.O). Si el pH se sale del rango, las metanogénicas se inhiben pero las acido génicas continúan su actividad y la laguna se puede acidificar, interrumpiendo el proceso de digestión anaerobia. Por otro lado, los metales pesados pueden inhibir el proceso.

Para algunos parámetros, los rangos presentados en bibliografía son muy amplios y dependen en gran medida de la composición y edad de los residuos. Por esta razón, y como se contaba con la información, se opto por observar los valores máximo, promedio y mínimo obtenidos de la serie de mediciones en el lixiviado generado en el RSa Las Rosas, previo a la entrada al sistema de tratamiento.

En la Tabla 61 y en la Tabla 62, se presentan algunos parámetros medidos en el lixiviado previo a la entrada a las lagunas.

	pH	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Fosforo Total (mg P-PO_4/L)
Promedio	8,2	7015,8	148,5	15,8
Máximo	8,5	12700	390	32,1
Mínimo	7,6	594	35	1,6

Tabla 61.- Parámetros medidos en el lixiviado previo al tratamiento

	Plomo (mg/l)	Mercurio (mg/l)	Cromo total (mg/l)	Zinc (mg/l)
Promedio	0,074	8,1E-04	0,179	0,29
Máximo	0,452	1,0E-03	0,470	0,4
Mínimo	1,0E-05	1,0E-06	1,0E-05	0,18

Tabla 62.- Metales pesados medidos en el lixiviado previo al tratamiento

En la Tabla 63 se presentan los valores limitados por el Decreto 253/79

Parámetro	Valor
pH	Entre 6,0 y 9,0
SST (mg/L)[14]	150
Fosforo Total (mg P/L)	5
Plomo (mg/l)	0,3
Mercurio (mg/l)	0,005
Cromo total (mg/l)	1
Zinc (mg/l)	0,3

Tabla 63.- Valores limites admitidos por el Decreto 253/79.

Se observa que de los valores promedio de los parámetros medidos en el lixiviado generado en Las Rosas previo a la entrada a la planta de tratamiento, todos verifican los valores máximos admisibles planteados por el decreto, excepto el fosforo (los sólidos totales no se limitan ni en el decreto vigente ni en la modificación propuesta).

De igual forma, se sabe que existe remoción de fosforo en el humedal, con lo cual se podría esperar que si el lixiviado a generar en el Relleno Regional presentara parámetros similares, a la salida de la planta de tratamiento se alcancen valores de fosforo admisibles para el vertido directo al curso de agua.

5.7.2 Selección de la alternativa

La generación de lixiviado, se caracteriza por presentar una gran variabilidad en los caudales y concentraciones, en función de la etapa de operación del relleno y las condiciones climáticas. Debido a esto, se evita utilizar tecnologías como lodos activados o reactores UASB ya los mismos presentan una gran sensibilidad a las características del líquido de entrada.Por otro lado, para lograr amortiguar los cambios que se dan en el efluente deben ser diseñados con largos tiempos de retención hidráulicos, mayores a los recomendados y en consecuencia se necesitarán varias etapas y un mayor grado de mecanización, lo que a su vez complejizará su operación.

En este caso, se opta sistemas robustos y de simple operación y mantenimiento, como ser los sistemas naturales, de manera que no sea necesario contar con un servicio de tiempo completo de personal capacitado para poder operar y mantener el sistema. Asimismo, se evita el riesgo de interrupciones por roturas en piezas y equipos mecánicos, dándole confiabilidad al sistema.

Los sistemas naturales son unidades de tratamiento biológico que logran depurar el efluente mediante procesos de estabilización naturales, por lo tanto sus ventajas y desventajas están asociadas principalmente a fenómenos naturales. Dichos fenómenos requieren largos tiempos de retención para que las reacciones puedan llevarse a cabo, lo cual implica contar con grandes

[14]Los SST no se limitan en el decreto, se presenta el valor de la Propuesta de Modificación del Decreto 253/79 (GESTA AGUA)

extensiones de terreno; sin embargo en este caso ésta no es una restricción ya que el predio seleccionado cuenta con suficiente área.

El efluente tratado será vertido al arroyo Las Maulas; por lo tanto el diseño del sistema de tratamiento se realizó de forma que asegure que las condiciones de vertido cumplan con lo exigido por el Decreto 253/79 y Modificativos para la descarga directa a curso de agua.

La alternativa seleccionada consiste en un sistema de lagunas en serie seguidas por un humedal de flujo vertical. El sistema estará compuesto por:

- 1 Laguna de ecualización
- 1 Laguna anaerobia
- 2 Laguna facultativa
- 1 Humedal de flujo vertical

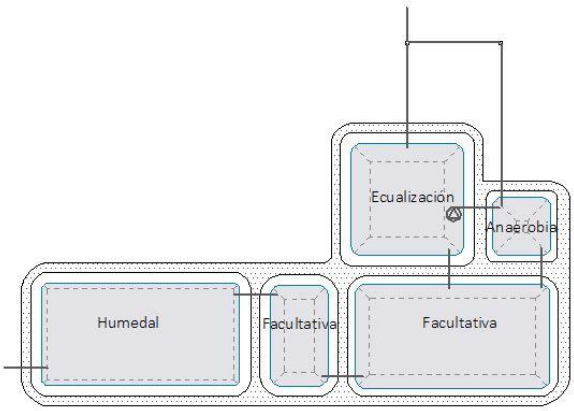


Figura 24.- Esquema tratamiento

Los cambios bruscos de caudales y concentraciones del efluente afectan el funcionamiento de las lagunas y pueden romper el equilibro entre las comunidades biológicas que intervienen en los procesos de depuración. Si esto ocurre se requieren largos periodos de tiempo para que se establezcan las condiciones en la laguna.

Debido a esto, se optó por incorporar una laguna de ecualización cuyo objetivo principal es amortiguar los picos de lixiviados generados en eventos de lluvia y consecuentemente las variaciones abruptas de las concentraciones de entrada asociadas a su ocurrencia, permitiendo enviar un caudal más estable a la planta de tratamiento y protegiendo de esta manera el funcionamiento de las lagunas de estabilización.

A su vez, en función de las condiciones del tiempo(seco o lluvioso) y en función de la magnitud del evento de lluvia, se definieron diferentes configuraciones en el funcionamiento del tratamiento

del sistema de tratamiento, de manera que se logre verter en todos los escenarios con las concentraciones exigidas por el Decreto 253/79.

A continuación se describen las diferentes configuraciones planteadas. El detalle del diseño y funcionamiento de las mismas se presenta en la Sección 6.2. de la Memoria de Cálculo (Tomo 2).

5.7.2.1 Tiempo seco

En tiempo seco, es decir cuando no hay eventos de lluvia, el lixiviado que llega a la planta de tratamiento es el base, el cual se genera a partir de la humedad propia de los residuos en el relleno.

El lixiviado base igualmente presenta variaciones, tanto en su caudal como en su concentración, a lo largo de la vida útil del relleno. Respecto al caudal, aumenta a medida que se van colocando los niveles de residuos. Se presenta un pico luego del último año de funcionamiento, debido a la colocación de la cobertura final, cuyo peso sobre la masa de residuos ocasiona un aumento brusco en el caudal de lixiviado.

Exceptuando el pico asociado a la clausura de los módulos, las variaciones de caudales y concentraciones se dan progresivamente a lo largo de los años y dentro de un rango que no afecta significativamente al funcionamiento de las lagunas. Por lo tanto en este caso el efluente se conduce directamente a la laguna anaerobia, posteriormente a las facultativas instaladas en serie y por último al humedal. En el esquema de la Figura 25 se observa la trayectoria del efluente (en líneas naranja).

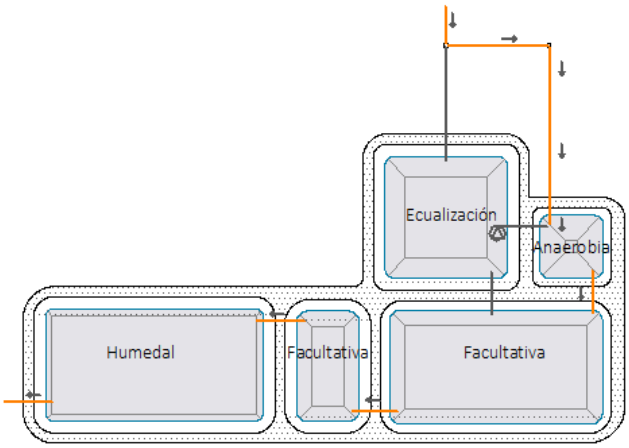


Figura 25.- Sistema de tratamiento en tiempo seco

5.7.2.2 Tiempo de lluvia

En caso de que se presenten eventos de lluvia que generen un aumento significativo en la cantidad de lixiviado, el efluente es desviado a la laguna de ecualización y luego bombeado

controladamente hacia la laguna anaerobia siguiendo la trayectoria presentada en el siguiente esquema (línea verde).

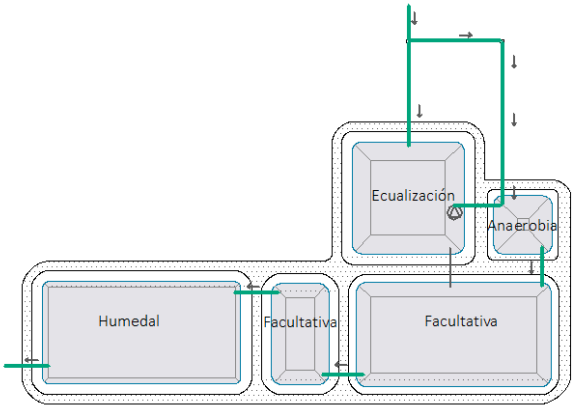


Figura 26.- Sistema de tratamiento en tiempo de lluvia

Por otro lado, si el evento es de tal magnitud que genera que el lixiviado que ingresa a la laguna supere la capacidad de bombeo y llene la laguna de ecualización, se prevé un vertido libre hacia la primera laguna facultativa, evitando de esta manera el desborde de la laguna de ecualización.

El vertido se realiza hacia la facultativa ya que por sus dimensiones admite mayores tiempos de retención y menores cargas de ingreso, de verter hacia la anaerobia, este gran caudal "lavaría" la laguna afectando su funcionamiento. Además las concentraciones de este efluente son bajas en comparación con el caudal base ya que el mismo se diluye en el caudal de lluvia. Las concentraciones esperables son admisibles para que el efluente pueda ingresar a la laguna facultativa.

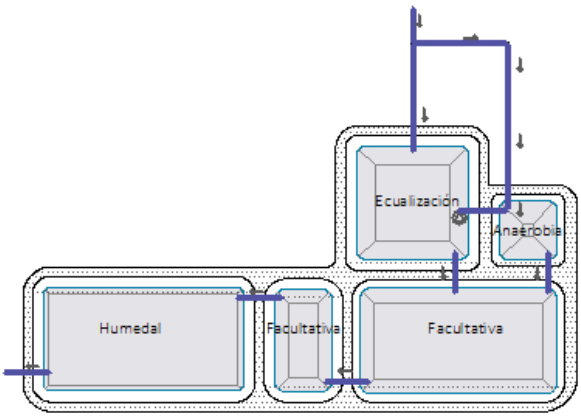


Figura 27.- Sistema de tratamiento en eventos de gran magnitud

La mayor limitante en el diseño de las lagunas, es la baja disponibilidad de información referente a los parámetros de diseño de este tipo de sistemas para tratamiento de lixiviado, razón por la cual la mayoría de los proyectistas dimensionan las unidades utilizando parámetros de efluentes

domésticos[15], para los cuales se tiene un vasta información. Asimismo, si bien existen datos experimentales para lixiviados, la fuerte dependencia del desempeño de las lagunas en función de las condiciones climáticas y características del lixiviado, hacen que los resultados puedan ser utilizados bajo condiciones similares a las cuales se realizó el experimento.

5.7.3 Ingreso a la planta de tratamiento

Debido a que funcionamiento del sistema de tratamiento es diferente en tiempo seco y en tiempo de lluvia, se debe diseñar un sistema capaz de desviar parte del caudal a la laguna de ecualización, mientras que se continúa enviando el caudal máximo de diseño en tiempo seco a la laguna anaerobia.

La alternativa seleccionada es una cámara de rebose con una tubería de salida hacia la laguna de ecualización y un orificio ahogado, para conducir el caudal hacia la laguna anaerobia, que limita la descarga en el máximo el caudal de diseño en tiempo seco.

La principal razón para la elección de este sistema, y no una cámara con vertedero, es la importante diferencia entre el máximo caudal a enviar a la laguna anaerobia y el caudal máximo capaz de ingresar a dicha cámara. El ancho de vertedero resultante capaz de dividir dichos caudales resultaba muy grande.

Los caudales mencionados son:

$$Q_{max}^{Anaerobia} = 0.00045\ m^3/s$$

$$Q_{max}^{Ecualizacion} = 0.0328\ m^3/s$$

5.7.4 Laguna de ecualización

Para el diseño de la laguna de ecualización se realizó un balance en la laguna de paso mensual, con el lixiviado generado a partir de la serie de precipitación seleccionada. El caudal que se almacena en la ecualización es bombeado posteriormente a la laguna anaerobia.

Para la selección de el caudal máximo de bombeo se tuvieron en cuenta varios factores, por un lado, el efecto que tiene la entrada de dicho caudal a la laguna anaerobia, para lo cual se tuvo como criterio que el tiempo de retención no sea menor a 3 días. A su vez, el caudal de bombeo debe ser lo suficientemente grande como para lograr vaciar la laguna de ecualización en un tiempo razonable, del orden de semanas, evitando períodos prolongados de almacenamiento del lixiviado que además implican grandes volúmenes de almacenamiento.El balance realizado y cálculo del diseño de la laguna de ecualización se describe en la Sección 6.2.3.1., de la Memoria de Cálculo.

[15] Fuente: PROSAB

En el Gráfico 38, se presentan las series de lixiviado total, el almacenado en la ecualización y el que ingresa al tratamiento, donde se puede observar claramente el efecto que tiene la laguna de ecualización sobre los picos de caudales.

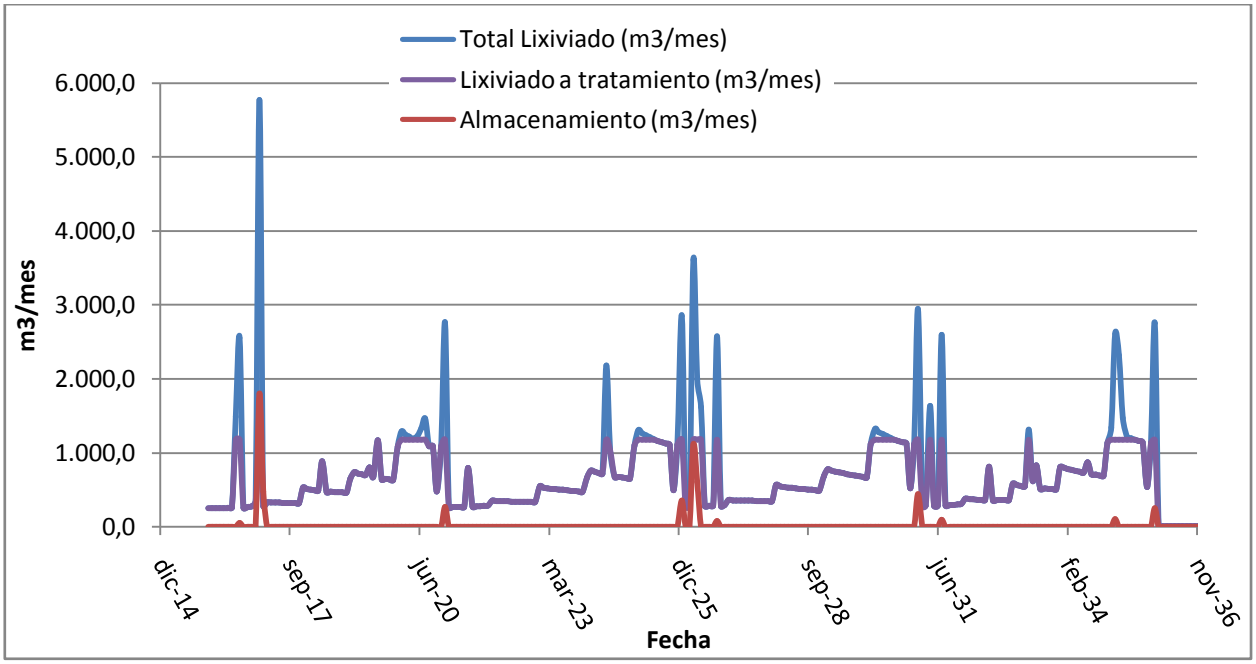


Gráfico 38.- Funcionamiento laguna ecualización

En la Tabla 64 se presentan la permanencia dentro de la serie de datos de cada uno de los caudales de diseño durante el período de actividad del RSa (2016-2035), así como también el porcentaje de utilización del almacenamiento.

	Caudal		Permanencia
	m^3/mes	m^3/día	Durante funcionamiento (2016-2035)
Mínimo	267,2	8,9	5%
Medio	502,9	16,8	38%
Máximo	1.173,6	39,1	41%
Bombeo	1.326,4	44,2	16%
Utilización del almacenamiento			5%

Tabla 64.- Permanencia caudales de diseño

Como se puede observar en la Tabla 64, los caudales que presentan mayores permanencias son el medio y el máximo correspondientes a tiempo seco. Por lo tanto se adoptarán las dimensiones de las lagunas diseñadas para tiempo seco y se verificará su funcionamiento para el caudal pico.

$$Q_{pico} = Q_{max} + Q_{bombeo} = 2500\ m^3/mes$$

5.7.5 Laguna anaerobia

Las lagunas anaerobias realizan la estabilización de la materia orgánica a través de la acción bacteriana anaerobia. Son especialmente recomendadas para efluentes con alto contenido de materia orgánica ya que admiten altas cargas de DBO por unidad de volumen de laguna. Debido a esto se plantean como la primera unidad de tratamiento del lixiviado.

Para lograr que se den condiciones anaerobias estrictas se diseñan con un volumen pequeño en relación a la materia orgánica a tratar, poca área superficial y gran profundidad. De esta manera, por un lado se minimiza el área superficial de intercambio de oxígeno y por otro, se logra que la tasa de consumo de oxígeno sea mayor a la tasa de aporte. En general, se recomiendan profundidades de entre 2,5 y 5 m; en este caso, se diseñará la laguna con una profundidad útil de 2,5 m.

Se plantea una geometría cuadrada de manera que se favorezca el flujo de tipo mezcla completa, que permite tener una mejor respuesta frente al ingreso de inhibidores y frente a cambios bruscos de la calidad del efluente de entrada.

La tasa de aplicación volumétrica es un parámetro de gran importancia para el diseño de la laguna, dependiendo principalmente de la temperatura, a mayor temperatura; se permiten mayores tasas de aplicación y por lo tanto menores volúmenes. Según Mara (1997), la relación entre las tasas de aplicación y la temperatura es la siguiente:

Temperatura media del aire en el mes más frío (°C)	Tasa de aplicación volumétrica admisible: Lv (kgDBO/m^3.d)
10 a 20	0.02T - 0.1
20 a 25	0.01 T + 0.1
>25	0.35

Tabla 65.- Tasas de aplicación volumétrica, Mara 1997

La ecuación utiliza la temperatura media del aire en el mes más frío para estar del lado de la seguridad ya que, por un lado la temperatura en el agua va a estar un poco más elevada que en el aire y por otro, seleccionando el período más frío estamos en el caso crítico para el funcionamiento de la laguna, en lo que refiere a las velocidades de las reacciones que se dan.

La temperatura media del aire en el mes más frío en Mercedes es de 11°C[(16)], por lo tanto según Mara la tasa de aplicación admisible es de 0.12 kgDBO/m^3.d. Sin embargo, dado que el efluente presentará variaciones tanto en el caudal como en la calidad se tendrán variaciones inevitables de dicha tasa. A los efectos del diseño se consideró entonces un rango admisible de entre 0.1 y 0.3 kgDBO/m^3.d

El criterio considerado para el diseño respecto al tiempo de retención, se tomó de recomendaciones para efluentes domésticos. No se recomiendan tiempos menores a tres días ya

[16] Calculada a partir de la serie de temperaturas medias de la estación meteorológica Mercedes.

que podría ocurrir que la tasa de salida de las bacterias metanogénicas sea mayor a la tasa de reproducción y por lo tanto difícilmente se mantenga una población estable.

Las eficiencias de remoción planteadas por diferentes autores son muy distintas ya que dependen en gran media de las características climáticas del sitio, el tiempo de retención y el tipo de efluente en el que se realizaron las pruebas. Los rangos usuales de eficiencias para efluentes domésticos en DBO son usualmente de 50 – 70 %.En este caso se considerará una eficiencia máxima de 55 %, dado que el lixiviado presenta una menor biodegradabilidad que los efluentes domésticos y sumado a esto, se tienen temperaturas bajas y los tiempos de retención se verán reducidos en casos de eventos de lluvias.

Respecto a la acumulación de lodos en la laguna, la tasa de acumulación para efluentes domésticos es del orden de 2 – 8 cm/año (Silva, 1993). El lodo se degrada a lo largo de los años en la laguna hasta llegar a ser un lodo prácticamente inerte que presenta como principal ventaja que no necesita ser tratado. En estos sistemas se puede operar durante varios años, eventualmente durante todo el período de proyección sin necesidad de remover el lodo; sin embargo al tratarse de lagunas de poco volumen, la acumulación de lodo se hace sentir rápidamente. Por lo tanto, se debe realizar la limpieza de la laguna en caso que el lodo alcance la mitad de la altura útil.

5.7.6 Lagunas facultativas

Las lagunas facultativas realizan la estabilización de la materia orgánica por la acción de bacterias aerobias en la capa superior y de bacterias anaerobias o anóxicas en la capa inferior; se distingue también una capa facultativa ubicada en el centro, que presenta condiciones variables aerobias y anaerobias. La presencia de oxígeno se logra por la reaireacion natural atmosférica, la cual se ve favorecida por la acción del viento, y a la fotosíntesis, que realizan las algas presentes en la capa superior, que generan la incorporación de oxígeno en la laguna durante el día.

El diseño se realiza con altos tiempos de retención y bajas cargas orgánicas, de manera que permitan mantener condiciones aerobias en la capa superior. A su vez, se realizan con grandes áreas superficiales y poca profundidad con el fin de favorecer los fenómenos de aireación y la presencia de algas.

La profundidad recomendada para este tipo de lagunas es de 1.5 – 3 m, este es un parámetro de diseño importante ya que la actividad fotosintética que tiene lugar en la zona aerobia de la laguna depende de la penetración de la luz. Teniendo en cuenta las recomendaciones las lagunas facultativas se diseñaron con una profundidad de 1.5 m.

Para las eficiencias de remoción, teniendo en cuenta los mismos criterios planteados para la laguna anaerobia, se limita la eficiencia máxima a un 80 %.

En lo que refiere a la geometría adoptada, por un lado el régimen de flujo pistón es más eficiente en términos de remoción de materia orgánica, pero la mezcla completa es más apropiada en casos de gran variabilidad de cargas. En este caso, se tiene a la laguna anaerobia que amortigua en

cierto grado las variaciones del efluente a tratar, por lo que se opta por una condición intermedia entre flujo pistón y mezcla completa, conocida como flujo disperso.

La tasa de aplicación superficial es uno de los criterios de diseño fundamentales, ya que se basa en asegurar un área determinada de exposición a la luz solar de la laguna, de manera que la producción de oxígeno generado por el proceso de fotosíntesis pueda satisfacer la demanda de oxígeno necesaria para estabilizar la materia orgánica. Por lo tanto es un criterio que relaciona la actividad de las algas y el balance entre producción y consumo de oxígeno.

Las tasas admisibles dependen principalmente de la temperatura local y exposición solar. Por ejemplo para Brasil según Von Sperling, las tasas a adoptar son:

	Ls (kg DBO/hás.día)
Regiones con inviernos calientes y elevada insolación	240 – 350
Regiones con inviernos e insolación moderados	120 – 240
Regiones con inviernos fríos y baja insolación	100 – 180

Por otro lado, dentro de las diversas ecuaciones empíricas disponibles para la tasa de aplicación superficial Mara (1997) propone:

$$L_s = 350 \cdot (1.107 - 0.002T)^{(T-25)}$$

Siendo T la temperatura media del aire en el mes más frío (°C). Como se mencionó anteriormente, para Mercedes dicha temperatura es de 11°C; por lo tanto la tasa de aplicación superficial admisible es de 112 kg DBO/há.día.

Teniendo en cuenta las diferentes referencias expuestas, el rango que se consideró para el diseño de las lagunas facultativas fue entre 80 y 120 kg DBO/hás.día.

Respecto al tiempo de retención, al igual que en el caso de la laguna anaerobia se tuvieron en cuenta las recomendaciones para efluentes domésticos que garantizan estabilidad en la población de microorganismos (Tr > 15 días).

5.7.1 Humedal

Para el sistema de tratamiento definido, se propone como ultima unidad un humedal, con el principal objetivo es disminuir la concentración de nitrógeno del efluente previo a su vertido al curso de agua Las Maulas. Si bien en un humedal también se da la degradación de la materia orgánica, disminuyendo la concentración de DBO, en este caso se diseño la unidad en base a criterios de remoción de Nitrógeno.

Los humedales construidos son sistemas artificiales cuyo funcionamiento se basa en procesos de remoción físicos, químicos y biológicos que ocurren de forma natural en el ambiente. Por otro lado, los humedales construidos se destacan por ser sistemas robustos, de bajo consumo energético y escasos requerimientos de recursos humanos para su operación y mantenimiento.

En general, los humedales son estanques de poca profundidad con plantas acuáticas y pueden contener un medio poroso e inerte (por ejemplo grava). La interacción entre la vegetación, el material inerte y los microorganismos presentes en el efluente promueven los procesos de remoción de los contaminantes. Se suelen clasificar según las características del flujo en:

- Humedales de Flujo Superficial (FS)
- Humedales Subsuperficiales de Flujo Superficial (FSSH)
- Humedales Subsuperficiales de Flujo Vertical (FSSV)

En este caso el humedal seleccionado es del tipo de flujo vertical (FSSV), los cuales reciben el efluente por la superficie de la unidad y luego el agua tratada es colectada por tuberías dispuestas en el fondo. En la Figura 28 se presenta un esquema del tipo de humedal FSSV.

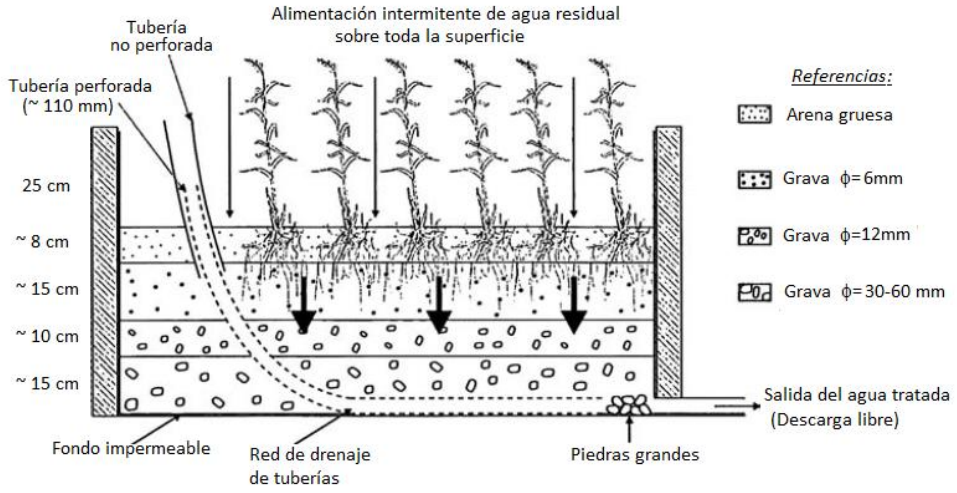


Figura 28.- Esquema típico de un humedal de FSSV

Los humedales FFSV fueron desarrollados para proveer mayores niveles de transferencia de oxigeno, y así producir un efluente nitrificado. Además, debido a su capacidad de oxidar el amonio, estos humedales son muy empleados para tratar efluentes con altos contenidos de amonio, como lixiviados de rellenos sanitarios o efluentes de industrias de procesamiento de alimentos (Kadlec & Wallace, 2009)

El principal mecanismo de remoción de nitrógeno en los humedales construidos es a través de la transformación de las especies mediante procesos de nitrificación seguidos por desnitrificación. También influye en la remoción de nitrógeno, pero en menor medida, la adsorción del amonio y la asimilación por parte de la vegetación (García & Corozo, 2008).

Según evaluaciones realizadas en humedales de flujo vertical para el tratamiento del lixiviado, en Italia, se han alcanzado eficiencias en remoción de amonio de hasta el 85%, con una tasa de

aplicación superficial de 1,88 g/m^2.dia[17] (equivalente a 18,8 kg/ha.d). Estos parámetros fueron los empleados para el diseño del humedal.

Por otro lado, el Decreto 253/79 fija como límite para el vertido a cursos de agua la concentración de amonio en 5 mg/L. Por otro lado, la modificación del Decreto 253/79 limita diferentes parámetros medidos en concentración de Nitrógeno, como se presenta en la Tabla 66:

Modificación Decreto 253/79	
Parámetro	**Valor**
Nitrógeno total como N (mgKje/L)	10
Nitrato-N (mg/L)	20

Tabla 66.- Valores limites para Nitrógeno según la modificación del Decreto 253/79

Como resulta altamente restrictivo el límite planteado por el Decreto 253/79, se opto por emplear los valores propuestos por la modificación. Con lo cual el valor limite de vertido para Nitrógeno Total queda fijado en 30 mg/L (considerando Nitrógeno Kjeldahl + Nitratos).

5.7.1.1 Características de Humedales FSSV

La relación largo/ancho no es importante en este tipo de humedales, ya que la entrada del efluente es a través de tuberías ubicadas en la superficie del mismo. Por otro lado, se recomienda que la profundidad sea entre 50 y 80 cm.

El sistema de entrada está constituido por redes de tuberías perforadas, colocadas sobre la superficie granular. Se deben diseñar los orificios de las tuberías de forma de lograr que el ingreso del líquido en toda la superficie sea uniforme.

El sistema de drenaje de salida también está conformado por tuberías perforadas, de diámetro a definir, dispuestos en forma paralela sobre el fondo y espaciados entre 0,50 a 0,70 metros. Por sobre las mismas se coloca una capa de áridos de aproximadamente 20 cm de espesor y tamaño efectivo de 8 a 16 mm. Estas tuberías se encuentran ancladas al fondo del humedal para permitir el drenaje de todo el efluente y deberán estar unidas a tuberías verticales no perforadas que atraviesen el manto poroso, para estar en contacto con la atmósfera.

En la Figura 28 se presenta un esquema en planta del sistema de tuberías de distribución y recolección.

[17] S.D Wallace & R.L. Knight – "Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems" – 2006. Pág. 256, Tabla 12-10

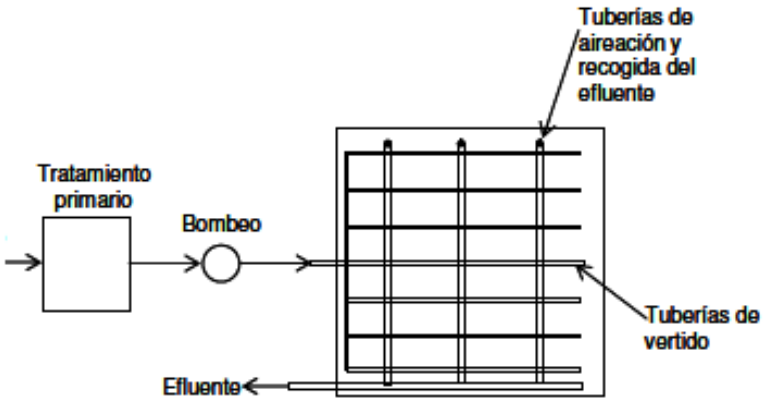


Figura 29.- Esquema en planta de las tuberías de distribución y recolección en humedales de flujo vertical

El manto poroso, por lo general, se encuentra dividido en capas. La capa superior está conformada por un material fino (arena) de 30 cm de espesos como mínimo, seguida de materiales de mayor granulometría aumentando progresivamente hasta alcanzar la capa inferior de drenaje, como por ejemplo grava de 5 a 20 mm de diámetro en 10 a 20 cm de espesor y luego grava nuevamente de 20 a 40 mm de diámetro en 10 a 20 cm de espesor.

La primera capa de arena es fundamental para el sistema, ya que debe ser lo suficientemente fina para retener los SST, pero suficientemente gruesa para permitir el flujo de agua sin colmatarse.

Por último, cabe destacar que los humedales de flujo vertical presentan mayores costos de inversión, lo cual se debe principalmente a la presencia del manto soporte. Además las tareas de mantenimiento para evitar la colmatación del manto, también aumentan los costos en este tipo de humedales.

5.8 Conducción de lixiviados

Se optó por utilizar un sistema de recolección de lixiviado en forma de espina de pescado, considerando las pendientes presentadas en la Sección XX de la Memoria Descriptiva. Con esto se busca minimizar el enterramiento, evitar costos excesivos de excavación y posibles problemas en el mantenimiento del sistema.

En la sección XX de la Memoria Descriptiva se presenta la conformación y dimensiones del sistema de conducción de lixiviados.

5.9 Generación del biogás

En la Sección4.2.4 se realizó el análisis de la generación de energía a partir del biogás producido en el relleno regional. De igual forma, en la Tabla 67 se presentan los resultados de biogás captado a partir del cual se determino el metano captado (suponiendo que el biogás está compuesto en un 50 % por metano). Se asumió que la eficiencia en captación del biogás es del 70 %, es decir que no

es captado por el sistema el 30 % del biogás generado en la degradación de los residuos, debido a pérdidas o fallas en la operativa.

Año	Modulo	Etapas	Biogás captado (m^3/año)	Metano captado (m^3/año)
2016				
2017				
2018	1			
2019				
2020				
2021		**Clausura módulo 1**	5,03E+05	2,52E+05
2022			3,87E+05	1,93E+05
2023	2		2,98E+05	1,49E+05
2024			2,31E+05	1,16E+05
2025			1,80E+05	9,02E+04
2026		**Clausura módulo 2**	6,61E+05	3,31E+05
2027			5,11E+05	2,56E+05
2028	3		3,97E+05	1,99E+05
2029			3,11E+05	1,55E+05
2030			2,45E+05	1,22E+05
2031		**Clausura módulo 3**	7,31E+05	3,65E+05
2032			5,68E+05	2,84E+05
2033	4		4,44E+05	2,22E+05
2034			3,50E+05	1,75E+05
2035			2,78E+05	1,39E+05
2036		**Clausura módulo 4**	7,77E+05	3,88E+05
2037			8,66E+05	4,33E+05
2038			6,80E+05	3,40E+05
2039			5,38E+05	2,69E+05
2040			4,30E+05	2,15E+05
2041			3,47E+05	1,73E+05

Tabla 67.- Resultados de generación de metano y biogás

5.9.1 Diseño del sistema de recolección de biogás

En la Figura 30, se presenta un sistema típico de recuperación de biogás en el que se utilizan pozos de extracción vertical, estos sistemas fueron descriptos en detalle en la Sección 2.5.1.1. Para el relleno regional se opta por realizar únicamente pozos de recolección verticales instalados luego de clausurado el módulo, ya que son sistemas más fáciles de instalar y no presentan riesgos de roturas debido al peso de la maquinaria de compactación o asentamientos diferenciales, como en el caso de la extracción mediante chimeneas horizontales.

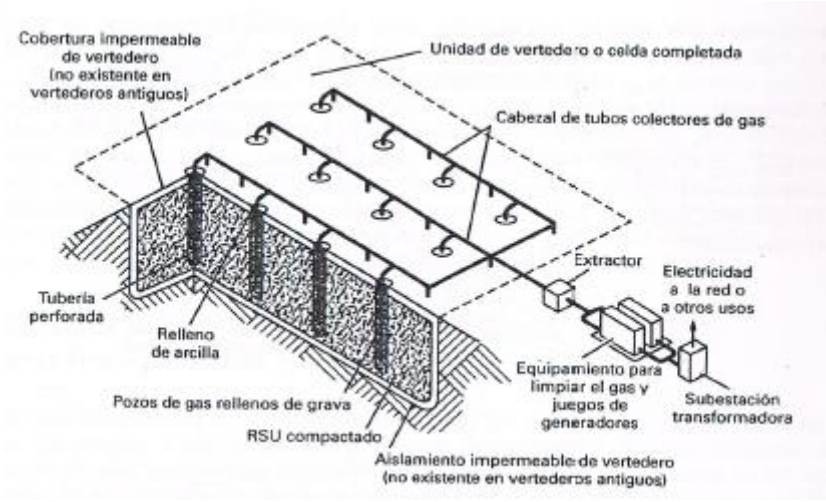


Figura 30.- Sistema de recolección de biogás

El radio de influencia de los pozos puede ser definido como el radio medio de un cilindro con eje en el pozo que determina un volumen dentro del cual el 90 % del biogás generado es captado por el pozo. El mismo depende de varios factores como ser la presión de succión del pozo, volumen de generación de biogás, densidad de compactación, presencia de líquidos entre otros, estos parámetros no pueden determinarse con gran precisión ya que no serán uniformes dentro del relleno y debido a esto en general su estimación se realiza empíricamente. Para el diseño del sistema de recolección se considerará que el radio varía entre 1 y 1,5 veces la profundidad del relleno, [9], en particular se diseñó con un valor medio de 1,25.

Los pozos de recolección se encuentran separados mediante determinada distancia de manera que sus radios de influencia se completen, en este caso se considerará un espaciamiento uniforme de los pozos y se controlará su zona de influencia ajustando la presión de succión a medida que el biogás producido disminuya o aumente. A su vez, se opta por una distribución en forma de triángulo equilátero. En la Sección 3.2. de la Memoria de Calculo (Tomo 2), se presentan los cálculos realizados para determinar el radio de influencia y la distancia entre los pozos de recolección.

5.10 Generación de energía

En Sección2.5.1.2se describen las diferentes tecnologías empleadas a nivel mundial para la generación de energía eléctrica a partir del biogás. Allí se vio que los motores de combustión interna de ciclo Otto son los más adecuados para la escala del caso de estudio.

A partir del biogás captado se determina la potencia necesaria y la energía eléctrica a generar, asumiendo que la eficiencia de recuperación de biogás es del 70%, que el rendimiento del motor es del 40% y que durante los primeros 5 años de operación del relleno no se extrae biogás, ya que el sistema de captación no se encuentra instalado. En la Tabla 68se presentan los resultados determinados bajo las consideraciones mencionadas.

Año	Etapa	Potencia del Motor	Potencia necesaria (kW)	Energía eléctrica (kWh)
2016				
2017				
2018				
2019				
2020				
2021	**1er Etapa (10 años)**	**130 kW**	87,33	765.008
2022			70,79	620.164
2023			57,62	504.775
2024			47,12	412.798
2025			155,49	1.362.094
2026			126,65	1.109.480
2027			103,66	908.096
2028			85,32	747.434
2029			70,68	619.143
2030			179,56	1.572.923
2031	**2da Etapa (11 años)**	**150 kW**	147,31	1.290.404
2032			121,57	1.064.929
2033			101,00	884.802
2034			84,56	740.731
2035			195,94	1.716.446
2036			161,74	1.416.822
2037			134,41	1.177.451
2038			112,56	985.985
2039			95,05	832.613
2040			81,00	709.539
2041			69,70	610.567

Tabla 68.- Potencia necesaria y Energía eléctrica generada con motor de combustión interna

En función de la cantidad de biogás captado y la energía eléctrica estimada a generar, como se muestra en la Tabla 68, se determinó la potencia necesaria de los motores, suponiendo que a los 10 años de adquirido el primer motor se realiza una reinversión y se compra un segundo motor (ver Tabla 44).

6 Conclusiones

Se pueden distinguir tres grandes componentes del proyecto. En primer lugar la aplicación de diversos modelos de generación de biogás, empleados a nivel mundial, a un caso local para luego seleccionar uno en particular. En función de la aplicación del modelo de generación de biogás a diferentes escalas, se buscó determinar a partir de qué población resulta viable la generación de energía en un relleno sanitario en el interior del país.

Luego, a partir del resultado anterior se vio que las localidades en el interior del país, por si solas no cumplen con los requisitos determinados. Con lo cual se propone un relleno regional como una solución viable para la disposición final de los residuos sólidos urbanos, al cual se le incorpora la generación de energía a partir de la descomposición de dichos residuos.

Se determinan nueve regiones aptas para la implantación de un relleno regional con generación de energía, de las cuales se selecciona una para ser analizada con mayor detalle. Con el objetivo de justificar, de forma económica, que un relleno regional es más rentable para el gobierno departamental, en comparación con un relleno local para cada ciudad, se realizó un análisis financiero contemplando la inversión, operación y mantenimiento de cada relleno local y del relleno regional. También se determinaron los costos de recolección dentro de cada ciudad y los costos de transporte hacia el relleno regional. Por último, se incluyó en el análisis financiero la rentabilidad de la generación de energía en el relleno regional.

Para concluir se determinó a nivel de anteproyecto el diseño, la operación y el mantenimiento del relleno regional para el caso de estudio seleccionado y justificado en las etapas anteriores.

De cada etapa se obtuvieron diversas conclusiones que en parte motivaron a las etapas posteriores y otras que sirven como aprendizaje.

En primer lugar, se debe destacar que la generación de energía depende directamente del recurso con el que se disponga a trabajar, en este caso el biogás. Dicho recurso es significativamente sensible a diversos factores, como por ejemplo las condiciones climáticas de la región, el sistema de operación y mantenimiento del SDF, la calidad de los residuos que se disponen, entre otros. Esto conlleva a dudar sobre el posible desempeño del proyecto ignorando o dejando de lado un recurso que puede ser muy aprovechable.

Es así que se hace notoria la dificultad en la operación del relleno y de la planta de generación de energía por parte de dos agentes diferentes, es decir un gobierno departamental junto con una empresa privada, ya que es de importancia el vínculo entre la correcta operación del relleno y la eficiente generación de energía, evitando que existan conflictos entre los intereses de cada una de las partes.

A partir del análisis financiero en los rellenos locales y el relleno regional, se observó una importante disminución en el costo de disposición final por tonelada para el relleno regional. Si bien la regionalización requiere de la unión de dos gobiernos departamentales y sus intereses

políticos, no se debe perder de vista esta solución para la disposición final de los residuos, no sólo por el ahorro económico que significa para cada intendencia, sino también por los beneficios ambientales debido a la generación de energía eléctrica a través de un recurso renovable y la construcción de un único relleno sanitario que atiende varias localidades.

Por otro lado, para que la generación de energía a partir de los residuos se convierta en un negocio atractivo es muy importante lograr definir una tarifa de venta que haga rentable el emprendimiento y que contemple los beneficios ambientales del proyecto. Dichos beneficios no son menores, ya que la disposición final de los residuos de forma adecuada y segura debería ser una obligación nacional y la generación de energía podría ser un beneficio económico para el encargado de la gestión, con un gran aporte ambiental.

Por último, cabe mencionar la necesidad de llevar un monitoreo continuo del funcionamiento del relleno, la generación de biogás y de energía, y de la calidad del lixiviado previo y posteriormente a su tratamiento. La medición de parámetros a nivel local es escasa, con lo cual muchas veces es necesario emplear valor de bibliografía o de las mediciones realizadas en otros países, lo cual afecta a los resultados teóricos obtenidos, pudiendo no llegar a ser del todo representativos para la realidad de nuestro país.

7 Bibliografía

[1] Compromiso Empresarial para el Reciclaje (CEMPRE) – "Residuos Sólidos Urbanos - Manual de GestiónIntegral"– 1998

[2] George Tchobanoglous – "Gestión Integral de Residuos Sólidos" –1992

[3] Ing. Wagner Colmenares Mayanga, Ing. Karin Santos Bonillla–Generación y Manejo de Gases en Sitios de Disposición Final

[4] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) – "Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos" –2007

[5] IPCC/OECD/IEA– Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, *"CH_4 Emissions from Solid Wast Disposal".*

[6] Aguiar-Virgen –"Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogas" –2011

[7] U.S. EPA – "Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User´s Guide" –2005

[8] U.S. EPA – "Manual de Usuario Modelo Centroamericano de Biogás" –2007

[9] Pablo Zamonsky, Sebastián Bajsa – Captura y Quema de Biogás en Rellenos Sanitarios y su utilización para la Generación deEnergía Eléctrica. La experiencia del Relleno Sanitario de Las Rosas

[10] Encuestadora ABRELP –"Panorama dos residuos sólidos no Brasil" –2014

[11] FICHTNER-LKSur "Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana" – 2005

[12] María José González – "Proceso técnico y político para la definición de una estrategia para instrumentar una solución consensuada a la disposición final de residuos sólidos urbanos en Uruguay" – 2012

[13] LKSur– "Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos", Informe 2: Canelones, San José, Melo, Tacuarembó, Salto y Paysandú –, 2013

[14] Horacio Terraza, Hans Willumsen–Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization – 2009

[15] U.S. EPA – "Catalog of CHP Technologies"– 2015

[16] CSI Ingenieros, Estudio Pittamiglio – "Información de base para el diseño de un plan estratégico de residuos sólidos" – 2011

[17] Jorge A. Bolaños, Cacho Ruíz – "Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos" – 2001

[18] Ing. Pablo Zamonsky, Ing. Sebastián Bajsa, Ing. Federico Steffenino – Comunicación personal – 2015

[19] SCS Engineers, USA: World Bank – "Comparison of Forecast and Reported Methane Recovery Rates at Selected Landfills in Developing Countries" – 2007.

[20] Terraza, H., H. Guimares y H. Willumsen.. "Design vs. Actual Performance and the Future for CDM Projects" – 2007

Páginas web visitadas

- http://www19.iadb.org/Residuos/informacion/InfoPais.bid;jsessionid=8637B86846C6061DB060DAE7C975C80F
- http://fld.com.br/catadores/pdf/politica_residuos_solidos.pdf
- http://www.redrrss.pe/material/20090128200240.pdf
- http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1439/tesis.pdf?sequence=1
- http://campus.usal.edu.ar/pluginfile.php/33674/mod_book/chapter/8020/riesgos-tecnologias-residuos-urbanos.pdf
- http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/graphics/2015/basura/MTB-Una%20Falsa%20Solucion.pdf
- http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen15/modelo.pdf
- https://observatoriopnrs.files.wordpress.com/2015/07/panoramaabrelpe.pdf
- http://www.brasil.gov.br/
- http://www.sinia.cl/1292/articles-49564_informe_final.pdf
- https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v1.pdf
- http://www.scorza.com.ar/es/detalleProducto?id=7

Memoria Estudios Básicos

Regionalización de Rellenos Sanitarios en el Interior del país, con generación de energía eléctrica



Verónica Garicoits

Luciana Pan

Tutores:

Dra. Ing. Elizabeth González

MSc. Ing. Nicolás Rezzano

Dr. Ing. José Cataldo

Proyecto de Fin de Carrera

Julio 2016

Índice

2 Revisión del Estado del Arte 7
2.1 Orígenes, características, propiedades 7
2.2 Gestión de residuos 9
2.2.1 Etapas de la gestión: 9
2.3 Alternativas de tratamiento 12
2.3.1 Clasificación/Separación 12
2.3.2 Reciclaje 13
2.3.3 Compostaje 15
2.3.4 Incineración 17
2.4 Rellenos sanitarios 19
2.4.1 Localización 20
2.4.2 Tipos de Rellenos Sanitarios 20
2.4.3 Tipos de tratamiento en rellenos 21
2.4.4 Métodos de vertido 22
2.4.5 Generación de Biogás 22
2.4.6 Generación de lixiviado 26
2.4.7 Operación y mantenimiento 27
2.4.8 Clausura del relleno 29
2.5 Modelos de generación de Biogás 30
2.5.1 Estimación estequiométrica 30
2.5.2 Modelos de Orden Cero 32
2.5.3 Modelos de Primer Orden y Multifase 34
2.5.4 Estimación de los parámetros 42
3 Análisis de las tendencias mundiales 47
3.1 Tipos de tratamientos para los residuos sólidos 47
3.1.1 Vitrificación 47
3.1.2 Biodrying 47
3.1.3 Tratamiento Mecánico-Biológico 47
3.1.4 Autoclavado de residuos sólidos urbanos 47
3.1.5 Biodigestión 47

3.1.6 Incineración Convencional 48
3.1.7 Co-incineración (plantas térmicas o cementeras) 48
3.1.8 Gasificación, pirólisis y arco de plasma 48
3.2 Situación Mundial 49
3.2.1 América Latina y el Caribe 49
3.2.2 Argentina 50
3.2.3 Brasil 53
3.2.4 Europa 54
3.2.5 Japón 59
3.2.6 Estados Unidos 60
4 Situación en el Uruguay 61
4.1 Marco Normativo 61
4.1.1 Residuos peligrosos: Ley Nº 17.220 de 1999 61
4.1.2 Residuos sanitarios: Decreto 586/2009 61
4.1.3 Residuos baterías plomo ácido: Decreto 373/2003 63
4.1.4 Envases de agroquímicos y obsoletos: Decreto 152/2013 64
4.1.5 Residuos sólidos industriales y asimilables: Decreto 182/2013 65
4.1.6 Ley de envases Ley Nº 17.849 de 2004 66
4.1.7 Decreto 260/2007 67
4.2 Interior del País: 67
4.3 Montevideo 69
4.3.1 Sector Informal 72
4.3.2 Actualidad 2015 en Montevideo 73
5 Anteproyecto ..... **¡Error! Marcador no definido.**
6 Bibliografía 79

Índice de Figuras

Figura 1.- Principio de jerarquía 11
Figura 2.- Planta de incineración Shibuya, Tokio 59
Figura 3.- Estructura del PDRS 70
Figura 4.- Contenedores en la vía pública 73
Figura 5.- Contenedores de "Tu envase sirve", Montevideo 74
Figura 6.- Ubicación Plantas de Clasificación 75
Figura 7.- Plantas de Clasificación 76
Figura 8.- Vista aérea de la Planta 77
Figura 9.- Pilas de acumulación de residuos orgánicos para generar compost 78
Figura 10.- Operación del RSa, Las Rosas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 11.- Pozo construido durante la operación ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 12.- Cabezal, Las Rosas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 13.- Central de desgasificación ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 14.- Antorcha y Motor de combustión interna ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 15.- Cabezal dren Felipe Cardoso ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 16.- Cabezal dren Las Rosas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 17.- Antorcha Felipe Cardoso ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 18.- Antorcha Las Rosas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 19.- Carreras del pistón ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 20.- Delimitación de la Región 3 ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 21.- Ubicación preliminar del Relleno Sanitario de la Región 3 **¡Error! Marcador no definido.**

Índice de Tablas

Tabla 1.-Componentes constituyentes orgánicos 31
Tabla 2.- Composición molar 31
Tabla 3.- Relaciones normalizadas 31
Tabla 4.- Valores de k [años-^{1}] sugeridos por la IPCC (Machado, 2009) 44
Tabla 5.-Clasificación de los SDF y factores de corrección para el metano 44
Tabla 6.- Valores por defecto de DOC, IPCC 45
Tabla 7.- Toneladas máximas a ser dispuestas 51
Tabla 8.- Plantas MBT en funcionamiento y % de reciclaje 53
Tabla 9.- Generación de residuos en el 2012 60
Tabla 10.- Tasa de generación y SDF por departamento 68
Tabla 11.- Resumen de la generación de residuos 71
Tabla 12.- Proyección de la generación de los RSU (ton/día) 72
Tabla 13.- Población proyectada a 2035 ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 14.- Caracterización de residuos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 15.- Resultados de los modelos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 16.- Factores de corrección IPCC ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 17.- Fracción rápida y lentamente degradable para distintas composiciones **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 18.-Motor de combustión interna ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 19.- Micro-turbinas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 20.- Ciclo combinado ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 21.- Producción de biogás para diferentes escalas de población ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 22.- Características equipos de generación eléctrica ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 23.- Potencia y energía máxima ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 24.- Total energía ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 25.- Viviendas abastecidas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 26.- Capacidad y utilización motores tres etapas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 27.- Resumen análisis financiero para tres etapas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 28.- Capacidades y utilización motores dos etapas ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 29.- Resultados análisis financiero para dos etapas..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 30.- Datos, caso de estudio ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 31.- Costos de Operación y Mantenimiento ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 32.- Biogás generado..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 33.- Etapas motores..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 34.- Costos de inversión ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 35.- Distribución de las horas de trabajo..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 36.- Distancias y rutas entre localidades..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 37.- Distancias y rutas desde las localidades hasta el RSa regional ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Acrónimos

RS: Residuos Sólidos

RSa: Relleno Sanitario

SDF: Sitio de Disposición Final

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

RSD: Residuos Sólidos Domésticos

RAEE: Registro de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

GEI: Gases de Efecto Invernadero

DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente

MVOTMA: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

EPA: Environmental Protection Agency

ALC: América Latina y el Caribe

1 Revisión del Estado del Arte

1.1 Orígenes, características, propiedades

Definición de Residuos sólidos:

Según Decreto 182/13:

"*Toda sustancia, material u objeto del cual se dispone o elimina, se tiene la intención de disponer o eliminar, o se está obligado a disponer o eliminar".*

"Los residuos sólidos incluyen todo residuo o desecho en fase sólida o semisólida, así como también aquellos en fase líquida que por sus características fisicoquímicas no pueda ser ingresado en los sistemas tradicionales de tratamiento de residuos líquidos".

Según Convenio de Basilea:

"*Cualquier sustancia, objeto o materia, del cual su poseedor se desprenda o tenga intención o la obligación de desprenderse, independientemente del valor del mismo".*

Según Digesto Municipal:

Título IV: De la higiene y limpieza públicas, Sección IV: De la recolección de residuos domiciliarios

Artículo D.1917:

"Se consideran residuos domiciliarios aquellos residuos sólidos generados en las actividades domésticas y cotidianas que se producen en casa-habitación, incluyendo el producido del barrido de la vereda frentista".

Artículo D.1919

"Se consideran residuos no domiciliarios:

a) Los generados por actividades industriales, comerciales, de prestación de servicios, productivas, educativas, culturales, sociales, sindicales, religiosas, sanitarias, institucionales y de organismos públicos y privados de cualquier índole.

b) Los generados por las construcciones, reformas, reparaciones y demoliciones de obras de construcción civil, incluidos los obtenidos de la preparación y excavación de terrenos para dichas obras independientemente de su volumen y aún cuando los mismos se generen en casa-habitación.

c) Los generados en zoológicos, parques y demás lugares de esparcimiento.

d) Los animales muertos.

e) Los productos decomisados.

f) Los generados por actividades de jardinería y poda.

g) Cualquier otro residuo que por su origen no sea domiciliario".

Clasificación:

- Por su naturaleza física: seco o húmedo
- Por su composición química: materia orgánica y materia inorgánica
- Por sus riesgos potenciales: peligrosos, no inertes.
- Por su origen: dónde o quién los genera.

Por su origen

- Domiciliarios (RSD): Residuos sólidos generados a partir de actividades realizadas en las viviendas o en establecimientos semejantes.
- Urbanos (RSU): Cualquier residuo clasificado como doméstico, comercial o público, o todo otro tales como:
  - Residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas.
  - Animales domésticos muertos, así como muebles, enseres.
  - Residuo o escombro procedente de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.
- Industriales (RSI): Residuos sólidos generados a partir de operaciones industriales o de su control, derivados de procesos de fabricación.
- De obras civiles (ROC): Residuos sólidos generados durante la construcción, demolición, reacondicionamiento o mantenimiento de cualquier obra civil, así como también los excedentes de las excavaciones.
- Sanitarios (RS): Residuos sólidos generados en centros de atención a la salud que prestan servicios asistenciales, también incluyen los generados en laboratorios clínicos.
- Especiales (RE): Residuos que deben ser manipulados en forma separada debido a sus características o volúmenes.

Características:

- Físicas: peso específico, densidad aparente, contenido de humedad, composición física (% de las fracciones de residuos sólidos), tasa de generación por habitante (kg/día/hab), etc.
- Químicas: se pueden caracterizar los residuos según su potencial de combustión: semihúmedos combustibles y no combustibles. Para los residuos combustibles es necesario conocer las propiedades dadas por: contenido energético (poder calorífico superior e inferior), composición química.

- Biológicas: algunas propiedades de la fracción orgánica de los residuos sólidos son: la biodegradabilidad (relacionada con el contenido de lignina [1]), producción de olores, reproducción de moscas, siendo estas últimas una consecuencia de las características putrefactibles de los materiales orgánicos.

1.2 Gestión de residuos

Gestionar los residuos de forma integral significa combinar todas sus etapas desde su generación hasta su disposición final, de una forma tal que se logren alcanzar máximos beneficios ambientales, económicos y sociales, obteniéndose de esta forma un manejo sustentable de residuos.

Se identifican dentro de la gestión de residuos, las etapas de: generación, manipulación y almacenamiento, recolección y transporte, tratamiento y disposición final.

No hay una única alternativa apropiada para la gestión de los residuos. En cada situación particular se deben aplicar herramientas de análisis ingenieril de forma de definir la más adecuada al contexto actual local.

1.2.1 Etapas de la gestión:

Generación

La generación de residuos contempla las actividades en las que los materiales son desechados por no asignarles valor adicional y recogidos juntos para su evacuación.

Manipulación y almacenamiento en origen

Involucra todas las actividades asociadas a la gestión de residuos previas a la colocación en los contenedores de recolección, realizadas bajo la responsabilidad del generador.

En esta etapa está incluida la clasificación o separación de los distintos componentes en origen. En lo que refiere a la clasificación, desde el punto de vista de las especificaciones de los materiales y de los ingresos por la venta de los materiales recuperados, el mejor lugar para separar los materiales es el punto de generación.

El almacenamiento es de gran importancia desde el punto de vista de la salud pública, además de por consideraciones estéticas. Una inadecuada forma de almacenamiento puede generar problemas de olores y proliferación de vectores, entre otros.

[1] Lignina: sustancia que aparece en los tejidos leñosos de los vegetales y que mantiene unidas las fibras de celulosa que los componen (Definición extraída de: http://www.wordreference.com/definicion/lignina)

Recolección y transporte

En esta etapa los residuos son recolectados y transportados desde el punto de generación al destino, que puede ser una planta de clasificación, una estación de transferencia, un vertedero, etc. Generalmente representa gran parte del costo total de la gestión de residuos.

La recolección selectiva tiene por objetivo recoger los residuos separados en su punto de origen. Como ventajas de la misma se destacan: la recuperación de materiales de buena calidad, ya que se evita la contaminación con otros materiales presentes en los residuos sólidos; la reducción del volumen y la peligrosidad del material que se debe enterrar y disminución de costos en la disposición final.

Por otra parte, para llevarla a cabo se necesitan camiones especiales que pasen en momentos diferentes que los de recolección convencional, lo que se traduce en un mayor costo de recolección y transporte. Además, inclusive con la clasificación en origen, se requiere de una planta de clasificación donde los materiales reciclables sean nuevamente separados.

Además, en muchos casos existe una etapa intermedia de transferencia de residuos desde un vehículo pequeño hasta un equipo de transporte más grande y su posterior transporte, generalmente a través de grandes distancias, a un lugar de tratamiento o disposición final. De esta forma se vuelve más efectivo y se logra economizar el transporte de los residuos.

Tratamiento

La necesidad de la etapa de tratamiento surge en respuesta a diversos problemas como la limitación del espacio para la disposición final y la necesidad de promover prácticas orientadas hacia la conservación de recursos, entre otros.

Abarca los procesos de separación, transformación y valorización de los materiales presentes en los residuos sólidos. Básicamente se pueden identificar dos grandes procedimientos: por un lado la clasificación y separación de diversos materiales con el fin de reciclarlos y/o compostarlos, logrando a su vez una reducción del volumen de residuos destinados a disposición final; y por otro la incineración, con el fin de reducir su volumen e inertizar, teniendo la posibilidad de recuperar energía.

Disposición final

La disposición final de residuos en rellenos sanitarios es el destino último de los residuos. Independientemente de la gestión que se lleve a cabo, siempre existe un resto remanente de residuos que deben disponerse adecuadamente.

Un relleno sanitario es una instalación de ingeniería utilizada para la disposición final de residuos sólidos, y es diseñada y operada para minimizar los impactos ambientales y posibles peligros para la seguridad o salud pública.

Principio de jerarquía

El principio de jerarquía establece un orden de prioridad de las acciones que componen la gestión de residuos:



Figura 1.- Principio de jerarquía

Reducción o minimización de residuos:

Implica reducir la cantidad y/o toxicidad de los residuos a generar, es decir, afecta el volumen pero también la naturaleza. Se encuentra en el primer lugar ya que evitar la generación de residuos es la forma más eficaz de reducir la cantidad y consecuentemente el costo asociado a su manipulación, y los posibles impactos ambientales adversos.

Reutilización (o reuso)

La reutilización se encuentra en el segundo lugar. Se realiza una vez que no pudo ser evitada la generación de los residuos. Su objetivo es desviar parte del flujo de materiales destinados a disposición final volviéndolos a utilizar para su fin original o para otro fin.

Reciclaje de materiales y tratamiento biológico

El reciclaje, incluido el compostaje y la biometanización, pero no la incineración, son procesos de gran importancia ya que reducen la demanda de recursos y la cantidad de residuos destinados a disposición final. Implica la clasificación y preparación de los materiales para su posterior transformación.

Tratamiento térmico con valorización energética

La valorización energética tiene por objetivo la recuperación y el aprovechamiento energético de los residuos.

Disposición final

En el último lugar de la jerarquía se encuentra la eliminación, entendiendo como tal a su disposición definitiva en un lugar controlado, que cumpla con normas operativas, de diseño y construcción, como la impermeabilización del suelo y sistema de drenajes de líquidos y gases. La generación de energía a partir de la recuperación del biogás, generado por la descomposición anaerobia de la materia orgánica es posible.

1.3 Alternativas de tratamiento

1.3.1 Clasificación/Separación

Es una forma efectiva para llevar a cabo la recuperación y reutilización de los materiales. La clasificación puede darse principalmente de dos formas: desde el origen de los materiales por el generador (población), con recolección selectiva y envío a una planta de clasificación; o directamente en plantas de clasificación luego de la recolección y el transporte de los residuos sólidos.

Clasificación en plantas

Aunque los materiales hayan sido separados en origen, probablemente se necesitará un procesamiento o separación adicional antes de poder ser reutilizados o reciclados.
La planta de clasificación de residuos tiene como objetivos:

- La separación de los materiales obtenidos a partir de puntos fijos de recogida selectiva.
- El procesamiento adicional de los materiales, mejorando su calidad a través de procesos de separación, limpieza, embalaje y transporte de grandes volúmenes.
- La recuperación de materiales reutilizables y reciclables.

Las plantas de clasificación y las de compostaje están íntimamente ligadas, aunque una planta de clasificación puede funcionar independientemente de que haya o no compostaje. Sin embargo, el compostaje exige una clasificación previa de los residuos.

La educación ambiental es fundamental para que se de el éxito en cualquier programa de recolección selectiva y se basa en el Principio de Jerarquía.

1.3.2 Reciclaje

"Es el resultado de una serie de actividades mediante las cuales materiales que pasarían a ser residuos, o que ya son residuos, son desviados, siendo separados, recolectados y procesados para ser usados como materia prima en la manufactura de artículos que anteriormente se elaboraban sólo con materia prima virgen." – Manual CEMPRE (1998)

Ventajas del reciclaje

- Disminuye la cantidad de residuos que se deben enterrar, aumentando la vida útil de los rellenos sanitarios.
- Preserva los recursos naturales.
- Economiza energía.
- Disminuye la contaminación del aire y de las aguas.
- Genera empleos, mediante la creación de industrias recicladoras.

Sin embargo, si por parte de la sociedad no existe demanda de productos reciclados, los materiales se amontonan en los depósitos y luego deben ser enterrados o incinerados como desechos.

Al momento de plantearse una estrategia de reciclaje, es importante identificar qué materiales van a ser desviados del flujo de residuos, las posibilidades de reutilización, reciclaje y las especificaciones exigidas por los compradores de estos materiales recuperados.

Materiales reciclables

PAPEL Y CARTÓN

El papel es un material constituido por una hoja delgada elaborada con pasta celulósica, compuesta principalmente por fibras de celulosa. Por otro lado, el cartón está compuesto por varias hojas de papel superpuestas a través de procesos de compresión y secado.

El papel se recicla introduciéndose nuevamente en el proceso productivo como materia prima, reduciéndose en primera instancia a pasta de papel. En general es combinado con nueva pasta procedente de fibras vírgenes ya que de esta manera se logra una mejor calidad.

Desde el punto de vista del proceso de reciclaje del papel los aditivos como: pegamentos, filmes metálicos o plástico, son considerados contaminantes. En estos casos, si bien es posible reciclarlos se tienen elevados costos del proceso.

PLÁSTICOS

Se denominan plásticos a los materiales sintéticos obtenidos a partir de recursos naturales, principalmente petróleo, mediante fenómenos de polimerización o multiplicación de los átomos de carbono en las cadenas moleculares.

Son materiales que brindan multiplicidad de prestaciones y ventajas frente a otros materiales clásicos como el papel y el vidrio debido a sus características de resistencia, peso, volumen, etc. Por otro lado, como principales críticas se destaca su baja biodegradabilidad, que ha llevado a la aparición de plásticos alternativos biodegradables en determinadas condiciones; y su origen, ya que proviene de una fuente no renovable.

Su reciclaje es altamente ventajoso desde el punto de vista del ahorro energético, consumiéndose menos energía al procesar material reciclado que material virgen. Sin embargo, no se deben perder de vista los costos asociados a la recolección y al acondicionamiento del material para poder ser aprovechado.

El proceso de reciclaje consiste en una primera etapa de clasificación de acuerdo al tipo de resina. El proceso de separación es muy complejo y difícil de realizar de manera rápida, automática y eficiente, por lo que la separación efectiva de los plásticos es uno de los motivos que restringe el reciclaje hoy en día.

La alternativa más utilizada consiste en triturar los plásticos luego de ser separados, limpiarlos para eliminar las impurezas y fundirlos para elaborar gránulos que posteriormente se utilizan en la fabricación de nuevos productos.

Otra alternativa es la recuperación de los componentes iniciales, sometiendo al material a procesos fisicoquímicos con el fin de recuperar las resinas vírgenes u otras sustancias de interés, como grasas y aceites combustibles. Esta alternativa implica altas inversiones en tecnología.

VIDRIO

Es un material que se obtiene a partir de la fusión a altas temperaturas de compuestos inorgánicos y su posterior enfriamiento hasta lograr un estado rígido. Está compuesto principalmente por sílice, carbonato de sodio y caliza.

Como ventajas, el vidrio es un 100 % reciclable ya que no tiene pérdidas de volumen ni de propiedades del material, por lo que el vidrio reciclado tiene la misma calidad que uno de material virgen. Además, por lo general se tienen pocas restricciones por parte de las autoridades sanitarias pudiendo ser utilizado para contener alimentos, bebidas y medicamentos.

En contraposición su volumen, costo y precio de venta son unas de las principales restricciones para el reciclaje.

El proceso de fabricación depende del producto final que se desee. El primer paso es su limpieza con productos químicos para eliminar las impurezas, luego se pasa por una serie de tamices y martillos hasta lograr la granulometría deseada. Posteriormente se funde y se mezcla con otros materiales como arena, caliza etc. para fabricar nuevos productos.

METALES

Los metales se clasifican según su composición en:

- Ferrosos: compuestos con elevado contenido de hierro
- No ferrosos: plomo, níquel, zinc, aluminio, cobre y sus aleaciones, como el latón (cobre/zinc) y el bronce (cobre/estaño), entre otros.

La mayor parte de los metales presentes en los residuos sólidos provienen de envases y latas, y en menor medida de utensilios y equipos desechados (ollas, electrodomésticos, etc).

En particular el gasto de energía necesario para el proceso de reciclaje del aluminio es 20 veces menor que para el metal primario; y si el proceso de reciclaje llevado a cabo es correcto, es posible fabricar una lata nueva a partir del aluminio presente en una lata vacía.

La gran ventaja del reciclaje de los metales es evitar los costos de reducción del mineral al metal. Además los metales pueden ser reciclados aun cuando ya se encuentran oxidados, y la identificación y separación de los mismos es relativamente sencilla, principalmente para los metales ferrosos que, por sus propiedades magnéticas, pueden ser separados utilizando grandes imanes.

Por otro lado, una de las desventajas de reciclar metales mezclados con otros materiales es que muchas veces es necesario llevar a cabo operaciones complementarias, como la eliminación de aceites.

ESCOMBROS

Es posible reciclar parte de los materiales presentes en los escombros para la producción de agregados. Por ejemplo, materiales como la cal, arena, piedra y materiales cerámicos como tejas, ladrillos, etc.

OTROS

- Neumáticos
- Tetra pack

1.3.3 Compostaje

"Es el proceso biológico de descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos y de la materia orgánica contenida en los restos de origen animal o vegetal. A partir del compostaje se reduce el volumen de los residuos sólidos y se altera su composición física, produciendo un subproducto útil. Existen diversos métodos en función de la cantidad de espacio disponible y las características de los residuos a tratar." – Tchobanonglous (1992)

En el contexto uruguayo, el compostaje es un tratamiento a considerar de importancia, ya que el 60 % de los RSU están constituidos por materia orgánica.

Ventajas del compostaje

- Mayor espacio en el relleno sanitario
- Mejorador de suelos
- Proceso ambientalmente seguro
- Eliminación de patógenos

Compostaje aerobio

Para llevar adelante el compostaje aerobio y generar un producto de buena calidad se necesitan determinadas condiciones físicas y químicas. El proceso puede darse por dos métodos:

1- Método natural: la fracción orgánica de los residuos sólidos se coloca en pilas de formas variadas. El tiempo del proceso varía de tres a cuatro meses.
2- Método acelerado: se colocan tuberías perforadas para darle la aireación suficiente a la pila de residuos, que se colocan por encima de dichas tuberías. O también se colocan los residuos dentro de reactores rotatorios donde avanzan en sentido contrario al de la corriente de aire, y luego se apilan de igual forma que en el método natural. El tiempo de permanencia en el reactor es de cuatro días aproximadamente, y el tiempo total del proceso es de dos a tres meses.

Factores de importancia

- Aireación: es necesaria para la actividad biológica y en niveles adecuados acelera el proceso de descomposición, sin malos olores.
- Humedad: para un buen compostaje, la humedad debe ser estar entre el 40 y 50 %, ya que si fuese muy baja se reduciría la actividad biológica y por el contrario si fuese muy alta se produciría anaerobiosis. De ser mayor a la recomendada, se generaría lixiviado y al compactarse las pilas, exprimiendo las capas inferiores y expulsando el aire de los vacíos, comenzándose el proceso de anaerobiosis provocando la putrefacción, con liberación de gas.
- Temperatura: al inicio del proceso la temperatura es la del ambiente, pero luego alcanza valores superiores, de hasta 55 - 60 °C, en la denominada fase termófila, la cual es importante para la eliminación de microorganismos y patógenos. Luego la temperatura disminuye hasta niveles inferiores a 12°C (temperaturas mesófilas).
- Nutrientes: la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) óptima debe ser del orden de 30/1, y el nivel de nitrógeno debe estar entre 1,2 – 1,5 %. Relaciones C/N más elevadas exigen mayor tiempo de compostaje.

- pH: los RSU poseen un pH inicial del orden de 4,5 – 5,5, lo ideal es que el pH este cerca de la neutralidad. Luego el compost curado humificado[2] tiene un pH del orden de 7,0 – 8,0.

En muchos casos se suele compostar en conjunto los RSU y los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, logrando de esta manera resolver el problema de dos tipos de residuos simultáneamente.

Compostaje anaerobio

La descomposición de la materia orgánica se produce por la acción de microorganismos anaerobios, liberándose una mezcla gaseosa de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), llamada biogás.

El compostaje anaerobio se realiza en recipientes cerrados (biodigestores). Además se diferencia del aerobio en que es menos eficiente en la reducción de agentes patógenos, y presenta mayor costo de inversión, principalmente cuando se opera en un rango de temperatura cerca de los 40°C. El producto obtenido no es adecuado para uso agrícola. Sin embargo, se considera como una alternativa ya que se puede generar energía a partir del biogás obtenido.

1.3.4 Incineración

La incineración es la quema controlada de materiales a altas temperaturas, por lo general superior a 900 °C, mezclados con una cantidad apropiada de oxígeno. Es una de las tecnologías térmicas existentes más conocidas para el tratamiento de residuos.

Ventajas de la incineración

- Importante reducción de los volúmenes a ser llevados a disposición final, reduciendo la necesidad de espacio.
- Reducción de impactos ambientales adversos en comparación con el relleno sanitario a largo plazo, ya que el residuo es destruido y no “guardado”.
- Destrucción de bacterias y virus, así como eliminación de compuestos orgánicos como el tetracloruro de carbono y dioxinas.
- Recuperación de energía para generar vapor o electricidad.

Desventajas de la incineración

- Costo elevado, tanto a nivel de inversión inicial como de operación.
- Necesidad de mano de obra calificada para la supervisión y operación de los incineradores
- Posibles problemas operacionales debido a la variable composición de los residuos
- No existe consenso técnico en cuanto al límite de emisión de dioxinas y furanos[3]. Sin embargo, si existen propuestas de estándares de emisiones.

[2] Compost curado humificado: indica que la materia orgánica se encuentra estabilizada y el producto tiene la calidad apropiada para ser utilizado como mejorador de suelos.

Previo a la incineración de un residuo se deben analizar determinados factores, como:

- Poder calorífico inferior (PCI): indica cuánto calor se libera durante la quema del residuo, sin tener en cuenta el cambio de fase del agua durante la combustión. Residuos con alto PCI consumen menos combustible, y un PCI muy variable puede dificultar el control de la temperatura del incinerador.
- Cenizas: producto de la incineración. El porcentaje de cenizas permite estimar el espacio necesario para el relleno sanitario en que habrán de disponerse.
- Humedad: mayor contenido de humedad perjudica la recuperación de energía. El Poder Calorífico Superior (PCS) tiene en cuenta el calor desprendido en el cambio de fase del agua líquida a vapor de agua.
- Azufre, cloro orgánico y nitrógeno: elementos que forman gases ácidos corrosivos que pueden afectar a los equipos.
- Metales: el mercurio, cadmio, plomo y otros, pueden hacer que las cenizas, los gases y líquidos producto de la incineración, sean tóxicos.
- Características especiales: existen otras propiedades de los residuos a ser identificadas para garantizar las condiciones adecuadas de la incineración. Estas son: olor, reactividad, etc.

En caso de incineración con recuperación de energía es muy importante conocer la composición de los RSU. Por ejemplo, alto contenido de humedad y bajo porcentaje de plásticos disminuyen la energía generada, elevando el costo de incineración por tonelada.

Además se debe fijar una tarifa adecuada para la energía recuperada, ya que la ganancia obtenida a través de la venta de la energía eléctrica influye directamente en el costo por tonelada incinerada.

Etapas de la incineración

1. Pre tratamiento/alimentación
2. Incineración:
    a. Combustión primaria: fase de duración de 30 a 120 minutos a temperaturas entre 500 y 800 °C. Se da el secado, calentamiento, liberación de sustancias volátiles y transformación del residuo remanente en cenizas. La masa de cenizas está formada por carbono no quemado, compuestos minerales de alto punto de vaporización y metales. Buena parte de los metales que componen el residuo original son evaporados o arrastrados por la corriente gaseosa, por lo que es necesario recolectarlos.
    b. Combustión secundaria: los gases, vapores y material particulado, liberados en la combustión primaria, son soplados o succionados hasta otra cámara, en la cual permanecen unos segundos expuestos a temperaturas de 1000 °C o más. En estas condiciones se da la destrucción de las sustancias volátiles y parte de las partículas. Los

[3] Dioxinas y furanos: constituyen una clase de sustancias organocloradas entre los que hay algunos compuestos extremadamente tóxicos. Pueden estar presentes en los residuos o formarse durante el enfriamiento de los gases incinerados.

factores que inciden en la eficiencia y eficacia de este proceso son: la temperatura, el tiempo, la turbulencia y el exceso de aire.

3. Control de emisiones:
   a. Control de combustión: condiciones apropiadas de combustión limitan la formación de dioxinas y furanos.
   b. Control de material particulado: se utilizan filtros, precipitadores electrostáticos y lavadores Venturi.
   c. Control de gases ácidos: se utilizan unidades llamadas “scrubbers” o lavadores de gases, o sistemas de inyección de absorbente seco (IAS).

La ceniza es un producto de la incineración de los residuos sólidos, y la gestión adecuada de la misma es de gran importancia debido a la presencia de metales pesados, por lo general procedentes de baterías, equipos electrónicos y plásticos. La ceniza de combustión puede presentar efectos potencialmente perjudiciales al contacto o la aspiración.

La incineración de residuos sólidos sanitarios es considerada como una de las mejores alternativas ya que reduce drásticamente el volumen del residuo y su peligrosidad. Además, el contenido energético es mucho mayor al de los RSU, por lo que la recuperación de energía es atractiva a partir de este tipo de residuos. Una desventaja es la variación en la composición, lo cual puede afectar seriamente al proceso de incineración. Además por tratarse de residuos potencialmente peligrosos, la operación debe ser rigurosamente controlada.

1.4 Rellenos sanitarios

Se denomina relleno sanitario a una instalación para la disposición final de residuos sólidos en la tierra que se caracteriza por ser diseñada, operada y controlada, con el fin de minimizar los impactos ambientales y proteger la salud pública. Por el contrario, al vertido no controlado se le denomina basural, basurero o vertedero a cielo abierto, aunque los vertederos pueden tener distintos grados de control sobre el vertido.

A los sitios de disposición que no se controlan se les atribuye problemáticas tanto sobre el ambiente, como sobre la salud de las personas. Se destaca la generación de malos olores, escape incontrolado de gases de efecto invernadero y lixiviados, que provocan la contaminación de suelos y cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Además son lugares preferenciales para la proliferación de vectores, como moscas, mosquitos, cucarachas, ratas, entre otros.

Independientemente del o los tratamientos elegido(s), incluso con el avance tecnológico, siempre quedará un residuo que deberá tener una disposición final segura. Por lo tanto, los RSa como destino final de los rechazos sigue siendo una componente de gran magnitud en la gestión integral de los RS; de ahí la importancia de este proceso.

1.4.1 Localización

Es una de las tareas más difíciles que debe afrontar la comunidad para la implantación del sitio de disposición final. Debe tener en cuenta diversos factores tales como:

- Distancia de transporte
- Disponibilidad del terreno
- Acceso al lugar
- Condiciones del suelo y topografía
- Condiciones geológicas e hidrológicas

Efectos sociales

Se han definido expresiones para las diversas reacciones producidas en determinados ciudadanos respecto a la instalación de ciertas actividades que son percibidas como peligrosas, y en muchos de estos casos hacia los rellenos sanitarios. Dentro de ellas se destacan:

- NIMBY: Not In My Back Yard
- NIMTO: Not In My Term Office
- NIABY: Not In Anybody's Back Yard
- NITC: Not In This Country
- NITP: Not In This Planet
- BANANA: Build Absolute Nothing Anywhere Near Anybody

1.4.2 Tipos de Rellenos Sanitarios

Relleno Sanitario para RSU

Éstos son diseñados para disponer RSU y en general también se aceptan residuos industriales no peligrosos.

Relleno Sanitario para residuos triturados

Este método de disposición implica la trituración de los residuos previo a su disposición final aumentando de esta manera su densidad. Permite evitar la cubrición diaria ya que las voladuras de materiales, olores y proliferación de vectores no son problemas significativos en la operación. Por otro lado, como desventajas de este sistema se destaca la necesidad de incorporar plantas de trituración. En general este método es utilizado en vertederos de pequeña capacidad.

Relleno Sanitario para residuos individuales

También son denominados monorellenos; son utilizados para constituyentes individuales de residuos como cenizas producto de la incineración y otros residuos generalmente especiales. De esta manera se logra aislarlos de los materiales colocados en los rellenos generales de RSU.

Relleno Sanitario diseñado para maximizar la producción de gas

Éstos son diseñados con el objetivo maximizar la producción de biogás. Algunas de las opciones posibles son el uso de celdas profundas recubiertas individualmente y la recirculación del lixiviado con el fin de intensificar el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica.

1.4.3 Tipos de tratamiento en rellenos

Tratamiento por digestión anaerobia

Es un método ampliamente aplicado a nivel mundial, el cual permite la recuperación de energía a partir del biogás. Por lo general se da naturalmente en rellenos de gran profundidad debido a las características anaerobias que se alcanzan. Sin embargo, requiere de altos controles ambientales debido a la composición de los gases y líquidos que se generan.

Tratamiento por digestión aerobia

Esta forma de tratamiento es la que presenta mayores ventajas con respecto a la descomposición de los residuos sólidos, pero a su vez los costos son mayores comparados con los de tratamiento por digestión anaerobia. La mayor desventaja es que es necesario inyectar aire dentro del relleno, lo cual aumenta los costos directos e indirectos.

Por otro lado, el lixiviado que se obtiene de este proceso presenta menores niveles de DBO y DQO, lo cual permite que el tratamiento del líquido sea más sencillo. Además, la descomposición de los residuos se da en períodos de tiempo menores y no se genera metano.

Tratamiento por digestión semiaerobia

Este sistema tiene como objetivo eliminar las desventajas de la implantación y operación de la inyección de aire dentro de los residuos sólidos, y para ello se propone la construcción de sistemas de circulación de gases, drenaje de líquidos y aireación natural por convección. De esta forma se reducen los altos costos del proceso de digestión aerobia y se aprovechan sus ventajas.

Esta alternativa ha sido empleada en Japón (Método Fukuoka).

Tratamiento biológico

Este tipo de tratamiento es empleado para acelerar el proceso de descomposición de la materia orgánica, a través de microorganismos específicos desarrollados en reactores, transformando la fracción orgánica sólida en líquidos y gases. Los líquidos resultantes son llevados a tratamiento, los gases generados son quemados a lo largo del proceso y los materiales inertes son dispuestos en un lugar específico, pudiéndose inclusive reducir su volumen mediante técnicas de separación y reciclaje.

1.4.4 Métodos de vertido

El método utilizado para el vertido de los residuos dependerá principalmente de la configuración y condiciones del terreno. Los más utilizados son la disposición en celda excavada, zona y depresión

Disposición en celda excavada

En este método los residuos se disponen en celdas excavadas, siendo necesaria la utilización de equipamiento para el movimiento de suelos. La tierra extraída de la excavación se utiliza posteriormente como material de cubrición. Usualmente el fondo y las paredes de las celdas se recubren con una membrana sintética y/o con arcilla de baja permeabilidad con el fin de limitar la infiltración del lixiviado y el movimiento de los gases del vertedero.

Es un método ideal para zonas donde se dispone de una cantidad adecuada de material de cubrición y nivel freático, que permitan una segura aplicación del método sin incurrir en costos excesivos.

Disposición en zona

Es utilizado cuando las condiciones del suelo no permiten la excavación de celdas, siendo necesaria la preparación del lugar mediante la instalación de un revestimiento y un sistema para el drenaje y control de lixiviados.

A diferencia del método de la celda, el material de cobertura debe ser extraído de otros terrenos lo más próximos posible siendo necesario su transporte en camiones, lo que aumenta el costo de operación del relleno. En lugares con limitada disponibilidad de material, se han utilizado para cubrición diferentes alternativas como compost, residuos de jardín, residuos de demolición, etc. También es posible utilizar materiales de cubrición temporal como tierra y geomembranas que pueden ser retiradas antes de comenzar el siguiente nivel.

Disposición en depresión

El método consiste en la disposición de residuos en zonas de depresión como fosas, canteras ya explotadas, etc. Las características de la zona son determinantes en las técnicas de colocación, compactación y control a utilizar. En general una de las principales dificultades de este método es el control del drenaje superficial.

1.4.5 Generación de Biogás

El gas generado en el relleno anaerobio, es un subproducto de la descomposición de residuos biodegradables. Este gas es un poco más liviano que el aire, y está compuesto usualmente por un 60 % de metano, 40 % de dióxido de carbono y mínimas cantidades de otros gases, como ácido sulfhídrico, hidrógeno y vapor de agua.

Su principal componente, el metano (CH_4), se caracteriza por tener un alto poder calorífico (34 MJ/Nm^3 CH_4). Además es un gas de efecto invernadero (GEI) con un potencial de calentamiento atmosférico 21 veces mayor al dióxido de carbono (CO_2). Se estima que el 11 % de las emisiones de metano a la atmósfera provienen de vertederos.

Además del efecto de las emisiones sobre el calentamiento global, cabe destacar que las emisiones tienen un impacto ambiental adverso local sobre la calidad del aire en los vertederos y en sus alrededores.

Por lo tanto, capturando este gas no sólo es posible reducir las emisiones de GEI, sino que también puede ser utilizado como una fuente no convencional de energía desplazando el uso de combustibles fósiles. En consecuencia, muchos de los proyectos de captura de biogás han jugado un papel significativo en la implementación del Protocolo de Kioto[4]

En Latino américa si bien la generación de energía a partir del biogás viene incrementándose año a año, actualmente en la mayoría de los casos se captura el gas y se quema en antorcha sin aprovechamiento energético del mismo.

El relleno está compuesto por distintos residuos que se degradan a diferentes tasas y dependen de diversos factores. En consecuencia la producción de biogás varía considerablemente de un relleno a otro, en función de la situación individual de cada uno. Los principales parámetros que influyen en la tasa de producción son: composición de los residuos; nutrientes; temperatura; pH; humedad; cobertura y densidad de compactación.

La composición de los residuos afecta principalmente la velocidad con la que se lleva a cabo la descomposición. Cuanto más rápido se descomponen los materiales, mayor es la tasa de producción de biogás. A su vez, varía de ciudad a ciudad; por ejemplo en ciudades de bajo y medio nivel económico se produce más material orgánico y menor cantidad de papel que las ciudades desarrolladas e industrializadas.

El contenido de humedad es uno de los parámetros más importantes en la generación de gas; si éste se aumenta levemente, el proceso se acelera considerablemente. Esto se debe a que las bacterias metanogénicas[5] se desarrollan en la película de agua ubicada alrededor de las partículas de los desechos. Por esto es que muchas veces en los rellenos sanitarios se recircula el lixiviado o se le adiciona agua para aumentar el contenido de humedad.

Respecto a la temperatura en el relleno, la condición óptima para las bacterias metanogénicas se da a aproximadamente 35 °C; en general estas temperaturas alcanzan en RSa con alturas útiles de

[4] Acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases del efecto invernadero que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), oxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoro de azufre (SF_6)

[5] Bacterias metanogénicas: son responsables de la formación de metano, que se da durante la Fase 4 en la biodegradación de residuos (ver pág. 26 “Fases de la biodegradación de los residuos”)

residuos sólidos mayores a 15m. El aumento de la temperatura genera un aumento en la actividad microbiana hasta llegar a su nivel óptimo.

La cobertura evita que la basura se encuentre en contacto con el aire, permitiendo que el sistema se mantenga en condiciones anaerobias y de esta forma se produzca biogás. Por otro lado, la compactación ayuda a reducir el tiempo de iniciación de la biodegradación anaerobia debido a que se aumenta el contacto con los nutrientes y la humedad al expulsarse el aire de los poros. Cuando no se dan las características anteriores, es decir que las capas de basura no son cubiertas y compactadas, ocurre descomposición aerobia, produciendo bajas cantidades de metano, con mayor generación de CO_2 y agua.

En los casos en que la degradación se produce en condiciones no controladas, es muy difícil predecir el nivel de biodegradación que ocurrirá en el relleno y la cantidad de biogás que se generará.

Fases de la biodegradación de los residuos

Fase 1: Ajuste inicial

Fase aerobia que se da inmediatamente después de que los residuos son depositados. Es una fase relativamente corta, en la cual la materia orgánica comienza a oxidarse por contacto con el oxígeno del aire, se produce dióxido de carbono y la temperatura comienza a elevarse.

Fase 2: Fase de transición

Fase aerobia, de transición, donde todavía no se instalaron las condiciones anaerobias. Ocurre un proceso de fermentación de la materia orgánica, descendiendo el nivel de pH y el oxígeno presente hasta agotarse por completo, hasta dar comienzo a la etapa anaerobia.

Fase 3: Fase ácida

En esta fase predominan las bacterias acidogénicas o no metanogénicas, en la cual se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase anterior. Se dan dos etapas. La primera es denominada hidrólisis o transformación enzimática, en la que compuestos con alto peso molecular (lípidos, polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos, etc.) se transforman en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía. Luego se da la acidogénesis o conversión microbiana de los compuestos resultantes de la primera etapa en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como por ejemplo el ácido acético. El dióxido de carbono es el principal gas generado durante esta fase.

Fase 4: Fase de fermentación del metano

Esta fase es dominada por microorganismos estrictamente anaerobios, denominados metanogénicos, que comienzan a desarrollarse hacia el final de la fase ácida y se caracterizan por convertir el ácido acético (CH_3COOH) y el gas hidrógeno en metano y dióxido de carbono.

En esta fase se alcanza el máximo nivel de producción de metano, pudiendo obtenerse entre un 40 – 60 % del volumen total del biogás. Los ácidos orgánicos presentes en el líquido percolado se descomponen rápidamente en biogás, disminuyendo la carga orgánica, debido a que sus componentes principales son de alta biodegradabilidad. En la ecuación a continuación se presenta la ecuación química de descomposición del ácido acético.

$$\underset{(\text{ácido acético})}{CH_3COOH} \rightarrow \underset{(metano)}{CH_4} + \underset{(\text{dióxido de carbono})}{CO_2}$$

Fase 5: Fase de maduración

Última fase, la cual se caracteriza por una disminución del contenido de humedad y la conversión del material biodegradable que antes no estaba disponible. Además existe una importante reducción de la velocidad de generación de gases, debido a que la mayoría de los nutrientes disponibles se han diluido en el medio líquido durante las fases anteriores.

En general, las altas temperaturas, altas tasas de compactación y la acumulación de los residuos en celdas pequeñas y capas delgadas tienden a acelerar los procesos de biodegradación.

Las primeras fases pueden tener duraciones de semanas a dos o más años. En tanto, las fases 3 y 4 pueden llegar a durar aproximadamente 5 años en su nivel de actividad más elevado. Por último la duración de la fase 5 dependerá en gran parte de las condiciones de operación desarrolladas en el relleno y pueden pasar décadas o incluso siglos para que los residuos presentes en el relleno se estabilicen por completo.

Debido a que el proceso de descomposición es muy complejo y se deben reunir determinadas condiciones para que se genere biogás, se estima que los residuos deben llevar depositados aproximadamente 1 año o más para que se comience a desarrollar la descomposición anaerobia y la generación de biogás. Asimismo, se estima que los residuos acumulados en un relleno pueden generar gas durante 20 a 30 años.

Conversión energética del Biogás

La utilización del biogás como fuente de energía local presenta diversos beneficios, tanto a nivel ambiental, por la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como a nivel socioeconómico, generando empleos e ingresos adicionales por la venta de la energía y diminuciones en los costos de la disposición final para los municipios y usuarios.

Existen varias tecnologías para la generación de energía a partir del biogás. Dentro de ellas se destacan las micro-turbinas, motores de combustión interna, ciclo combinado, turbinas a vapor generado en calderas, entre otras. Además existen tecnologías experimentales que permiten aprovechar tanto el CH_4 como el CO_2 generado en los rellenos. Sin embargo el sistema más utilizado para la recuperación energética es el motor de combustión interna.

1.4.6 Generación de lixiviado

El lixiviado se compone por el líquido proveniente de fuentes externas, principalmente de las precipitaciones y de los líquidos generados por la descomposición de los RS, que infiltran a través del relleno.

Se caracteriza por tener color oscuro, olor desagradable y altas cargas orgánicas, nutrientes, tóxicos y metales pesados provenientes de los diversos materiales depositados en el relleno. Debido a esto, el lixiviado es un elemento de riesgo para la contaminación de la napa freática y corrientes de aguas superficiales, por lo cual la adecuada recolección y planificación del tratamiento constituyen aspectos de importancia en el diseño de un RSa.

El suelo del sitio es un parámetro significativo a la hora de definir el sistema de aislamiento que impedirá la filtración del lixiviado a las capas profundas del terreno. En algunos tipos de suelo, como ser arcillo-limoso, que poseen baja conductividad hidráulica se busca compactarlos de tal forma que no permita el pasaje del líquido a través del terreno, aprovechando las características impermeables de estos materiales. Por el contrario los suelos arenosos no tienen esta capacidad de retención, al presentar una alta porosidad, por lo que se debe recurrir al uso de membranas o films de polietileno.

Algunos de los métodos para la recolección de los lixiviados son:

- Terrazas inclinadas
- Fondo con tuberías

Alternativas de gestión

Recirculación del lixiviado

Durante los primeros años del relleno el lixiviado posee altas concentraciones de materia orgánica, nutrientes y metales pesados, en función del tipo de residuos que se dispongan en el SDF. A partir de la recirculación del lixiviado es posible lograr que dichas concentraciones disminuyan, debido a los diversos procesos biológicos, reacciones químicas y físicas que ocurren dentro del relleno.

Evaporación

Para la evaporación del lixiviado se utilizan estanques recubiertos, para protegerlos de la lluvia, y lo que no se logra evaporar es regado por encima del material, mientras que los gases son extraídos y llevados hacia un filtro. Es necesario implementar una aireación superficial de forma de controlar los olores.

Tratamiento

Otra alternativas es adoptar un sistema de tratamiento completo. Existen diversos tipos de tratamiento en función de las características de los lixiviados. Por un lado, sistemas biológicos

como lodos activados, lagunas anaerobias, filtros percoladores, nitrificación/desnitrificación y por otro, sistemas químicos de neutralización, precipitación, ósmosis inversa, intercambio iónico, entre otros.

1.4.7 Operación y mantenimiento

A continuación se presenta un esquema del procedimiento llevado a cabo en un RSa desde el ingreso de los residuos hasta la disposición final de los RS y salida del camión.

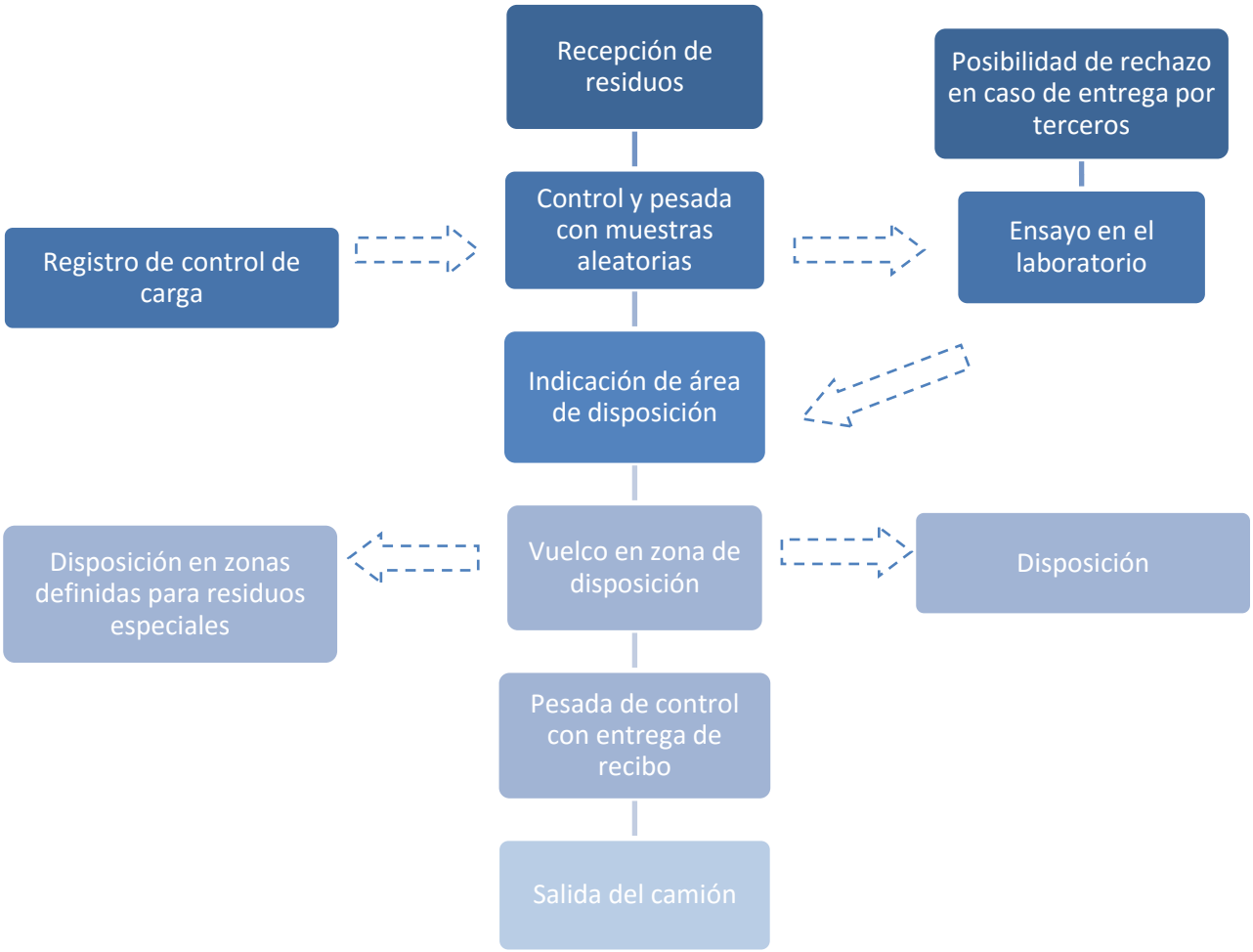


Gráfico 1.- Esquema de operación en un RSa: ingreso y salida de camiones recolectores

Una vez descargados los residuos en la frente de trabajo, los mismos son esparcidos y compactados con máquinas (bulldozer, traxcavator y rodillo pata de cabra), conformando la celda diaria proyectada. El procedimiento para la construcción de la celda diaria se describe a continuación:

1. Los camiones descargan los residuos sólidos en el frente de trabajo
2. Se esparcen los residuos sólidos con las bulldozer o traxcavator en capas de 0.4 m a 0.6 m de espesor. La superficie superior de la celda debe tener una pendiente (2% - 5%) tal que permita el escurrimiento pluvial.
3. Se compactan los residuos depositados con el rodillo pata de cabra hasta lograr la densidad de compactación y geometría de la celda.
4. Luego de la compactación de los residuos depositados a lo largo del día, se realiza la cubrición diaria de los mismos.

Principios de disposición

- El comienzo de la disposición depende de la pendiente del fondo del módulo y el sistema de drenaje, ya que de esta manera se busca separar las zonas de aguas contaminadas de las aguas limpias.
- El tamaño de las celdas a considerar dependerá de la cantidad diaria de residuos que se pretenda disponer.
- Es recomendable minimizar las áreas activas de disposición ya que las mismas están abiertas y sin cobertura.
- Las celdas se configuran formando una especie de engranaje, desplazadas entre ellas a nivel vertical y horizontal para garantizar mayor estabilidad de las celdas.

Cobertura

La cubrición diaria se realiza al término de cada día de operación, mientras que la cobertura intermedia se realiza con una frecuencia aproximadamente mensual y brinda una capa soporte para el tránsito de los camiones y maquinaria sobre los residuos ya dispuestos.

La cubrición diaria e intermedia de los residuos es de gran importancia para la correcta operación del relleno, de hecho, si no existe cobertura diaria la instalación no es considerada un RSa. El material utilizado puede ser suelo natural, preferiblemente suelos cohesivos no impermeables, o materiales como compost. En general en los primeros años de operación del relleno se utiliza el material extraído del desmonte (si se utiliza el método de celda excavada).

Las ventajas y desventajas de la cubrición son:

Ventajas

- Disminución de lixiviados.
- Disminución de malos olores.
- Disminución de escapes de gas.
- Reducción de voladuras de materiales.
- Reducción de problemas con aves y otros animales.

Desventajas:

- Aumento de costos.
- Pérdida de volumen útil en el relleno.
- Necesidad de material de cobertura.
- Posibilidad de formación de capas de deslizamiento.

1.4.8 Clausura del relleno

Luego de alcanzada la capacidad máxima del terreno para la disposición final de los residuos, se procede a la clausura. Sin embargo se debe tener en cuenta que las reacciones químicas, biológicas y físicas que tienen lugar dentro del relleno no cesan; continúan degradándose los materiales y produciendo subproductos. Por esta razón se deben desarrollar Planes de Clausura, que incluyan planes a largo plazo para el control de la escorrentía, la erosión y la recolección de gases y lixiviados.

A su vez, se debe planificar el diseño de la cobertura y el paisajismo del lugar, ya que a futuro, este sitio podrá ser utilizado como una plaza pública, centro de actividades al aire libre, entre otros. Además, debido a las características del suelo y los posibles asentamientos, no es usual ni se recomienda la construcción de edificaciones.

Se debe prever en el funcionamiento de los sistemas de recolección de gases y lixiviados una vida útil mayor a la proyectada para el relleno, ya que luego de cerrado las emisiones continúan, en menor proporción, por determinado tiempo. En algunos países existe normativa que requiere que la operación del vertedero continúe por más de 30 a 50 años luego de cerrado el vertedero.

Normalmente se debe contar con sistemas de supervisión ambiental, que implican la supervisión los gases y lixiviados, el monitoreo de calidad de aguas subterráneas y de la calidad de aire.

1.5 Modelos de generación de Biogás

1.5.1 Estimación estequiométrica

Es posible estimar la cantidad total de gas producida a partir de los RS directamente de la reacción estequiométrica pero es necesario tener en cuenta que las condiciones de humedad del relleno afectan significativamente la velocidad y el período de tiempo en que se produce el gas.

La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia puede escribirse de la siguiente forma:

$$Materia\ organica + H_2O \xrightarrow{bacterias} MO\ biodegradable + CH_4 + CO_2 + Otros\ gases$$

Se debe tener en cuenta que si bien la cantidad total de gas producido deriva de la reacción anterior, las condiciones hidrológicas locales afectan significativamente a la velocidad y al periodo de tiempo en el que tiene lugar la generación de biogás.

Partiendo de la suposición de que la fracción orgánica presente en los RS (exceptuando el plástico), se pueden representar genéricamente como $C_aH_bO_cN_d$, entonces se plantea la siguiente relación:

$$C_aH_bO_cN_d + \left(\frac{4a-b-2c+3d}{4}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{4a-b-2c+3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{4a-b-2c+3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{4a-b+2c+3d}{8}\right)C0_2 + dNH_2$$

En general se pueden dividir los materiales orgánicos presentes en los RS en dos, aquellos que se descomponen rápidamente (3 meses a 5 años) y los que se descomponen lentamente (más de 50 años)

Para determinar la cantidad teórica total del gas generado por unidad de peso seco es necesario conocer la distribución porcentual de los elementos más importantes que componen los residuos. A continuación se presentan las composiciones de los diferentes constituyentes en peso (tabla 1) y en moles (tabla 2) para obtener la formula química (tabla 3) de los residuos que se descomponen rápida y lentamente.

Componente	Peso húmedo (kg)	Peso seco (kg)	C	H	O	N	S	Cenizas
Constituyentes orgánicos rápidamente descomponibles								
Residuos de comida	9,00	2,70	1,30	0,17	1,02	0,07	0,01	0,14
Papel	34,00	32,00	13,92	1,92	14,08	0,10	0,06	1,92
Cartón	6,00	5,70	2,51	0,34	2,54	0,02	0,01	0,29
Residuos de jardín	1,10	4,40	2,10	0,26	1,67	0,15	0,01	0,20
Total	50,10	44,80	19,83	2,69	19,31	0,34	0,09	2,55
Constituyentes orgánicos lentamente descomponibles								
Textiles	2,00	1,80	0,99	0,12	0,56	0,08		0,05
Goma	0,50	0,50	0,39	0,05		0,01		0,05
Cuero	0,50	0,40	0,24	0,03	0,05	0,04		0,04
Residuos de jardín	7,40	3,00	1,43	0,18	1,14	0,10	0,01	0,13

Madera	2,00	1,60	0,79	0,10	0,69			0,02
Total	12,40	7,30	3,84	0,48	2,44	0,23	0,01	0,29

Tabla 1.-Componentes constituyentes orgánicos

Cálculo de la composición molar de los elementos despreciando la ceniza

	C	**H**	**O**	**N**	**S**
kg/mol	12,01	1,01	16,00	14,01	32,06
Moles Rápidamente	1,6511	2,6634	1,2069	0,0243	0,0028
Moles Lentamente	0,3197	0,4752	0,1525	0,0164	0,0003

Tabla 2.- Composición molar

Fórmula química aproximada (sin azufre)

Relaciones normalizadas (Nitrógeno =1)				
Componente	C	H	O	N
Rápidamente	68,04	109,75	49,73	1,00
Lentamente	19,48	28,95	9,29	1,00

Tabla 3.- Relaciones normalizadas

Por lo tanto, la fórmula química para los residuos que se descomponen rápidamente es: $C_{68}H_{111}O_{50}N$, y para los que se descomponen lentamente: $C_{20}H_{29}O_9N$

Las relaciones estequiométricas son entonces:

Rápidamente descomponible:

$$C_{68}H_{111}O_{50}N + 16H_2O \rightarrow 35CH_4 + 33CO_2 + NH_3$$

Lentamente descomponible:

$$C_{20}H_{29}O_9N + 9H_2O \rightarrow 11CH_4 + 9CO_2 + NH_3$$

Despejando de las reacciones anteriores se puede obtener la cantidad teórica total del gas generado por unidad de peso seco de materia orgánica degradada:

Rápidamente descomponible: $0{,}87\ m^3/kg$

Lentamente descomponible: $1{,}03\ m^3/kg$

Por último es posible estimar la producción de gas año a año del RSa aplicándolo en un modelo triangular, considerando que el tiempo de degradación los RSU rápidamente biodegradables es en promedio 5 años, y para los lentamente biodegradables 15 años.

1.5.2 Modelos de Orden Cero

Los modelos de orden cero se caracterizan por suponer una cantidad constante de producción de biogás a lo largo del tiempo de degradación. Es decir no tienen en cuenta el efecto de la edad de los residuos, dependiendo únicamente de la cantidad de residuos depositados.

A continuación se presentan algunos de los modelos de aplicación más usual para estimar la generación de biogás.

Método de Aproximación Simple (EPA)

Se basa en una relación empírica entre la cantidad de basura depositada en el relleno y el flujo de biogás observado en varios proyectos de recuperación de biogás. Se ha establecido que la generación de biogás varía entre 0.05 - 0.20 pies cúbicos (ft^3) al año, por cada libra (lb) de basura depositada, dando la siguiente relación.

$$Generacion\ anual\ de\ biogas\ (ft^3) = 0{,}10\ ft^3/lb\ x\ 2000\ \ lb/ton\ \ x\ Basura\ depositada\ (ton)$$

No representa con precisión las características de los residuos, el clima y otras variables presentes. En general la EPA recomienda utilizar esta regla sólo como un proceso preliminar. Al no tener en cuenta el tiempo que los residuos llevan depositados, la relación anterior es utilizada sólo para la calcular la generación durante un par de años luego de que se comienza a recolectar el gas; de ahí en adelante la EPA recomienda aplicar un factor de disminución anual de entre 2 y 3 % a la generación de biogás.

SWANNA (Solid Waste Association of North America)

El modelo considera indirectamente la composición de los residuos a través del parámetro L_0, conocido como el potencial máximo de generación de metano.

$$Q = \frac{M \cdot L_0}{(t_0 - t_1)}$$

Donde:

Q: caudal de metano generado (m^3/año)

M: residuos depositados en el relleno (toneladas)

L_0: potencial de generación de metano (m^3/ton)

t_0: tiempo de desfasaje (años)

t_1: tiempo de cese de generación (años)

Método por defecto (IPCC)

El "Default Method" se basa en un balance de masa asumiendo que todo el metano es liberado el mismo año que los residuos fueron dispuestos. Una de las principales ventajas de este método es que existe una amplia gama de información a nivel mundial en cuanto a los parámetros que considera.

$$QCH_4 = \left(MSW_T \cdot MSW_F \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} - R\right) \cdot (1 - OX)$$

Siendo:

QCH_4: Emisiones de metano [Gg/año]

MSW_T: Generación total de MSW (Municipal Solid Waste) [Gg/año]

MSW_F: Fracción de MSW dispuestas en el relleno sanitario

MCF: Factor de corrección para el metano

DOC: Fracción de carbono orgánico degradable [kgC/kgSW]

DOC_F: Fracción de DOC asimilada

F: Fracción de CH_4 en el biogás del relleno (el valor por defecto en IPCC es 0.5)

R: Cantidad de CH_4 recuperado [Gg/año]

OX: Factor de oxidación (el valor por defecto en IPCC es 0)

El IPCC propone dos métodos para estimar las emisiones de CH_4 procedentes de los RSa: el método por defecto y el método de primer orden. La principal diferencia entre ellos es que el método de primer orden entrega un perfil de emisión que considera el tiempo transcurrido y refleja en consecuencia el verdadero comportamiento del proceso de degradación a lo largo del tiempo, mientras que el método por defecto se basa en la suposición de que la totalidad de CH_4 se libera durante el año que se produce la disposición de los desechos.

Por lo tanto, el método por defecto permite obtener una estimación anual razonable de las emisiones reales, siempre que la cantidad y composición de los desechos eliminados se mantengan constantes o varíen muy poco.

1.5.3 Modelos de Primer Orden y Multifase

Estos modelos se basan en una cinética de descomposición de primer orden, representada por una ecuación del tipo:

$$q = a \cdot L_0 \cdot \left(1 - e^{kt}\right)$$

Siendo:

q: representa la generación de metano en el tiempo *t* (m^3)

L_0: potencial de generación de metano (Nm^3/ton)

k: tasa de decaimiento de metano ($año^{-1}$)

Modelo General (empleado en el Relleno Sanitario "Las Rosas")

$$G_{CH_{4,n}} = \sum_{t=c}^{n=1} k_i L_0 M_{i,t} e^{-ki(n-t)}$$

Donde:

$G_{CH_{4,n}}$: volumen de metano generado en el año de proyección *n* [m^3/año]

c: año de inicio de la disposición de residuos en la celda de influencia de la red de captación de biogás (c<n)

k_i: tasa de generación de metano de la fracción *i* de residuos [$año^{-1}$]

L_0: potencial máximo de generación de metano [Nm^3/ton]

$M_{i,t}$: toneladas de residuos sólidos dispuestos o proyectados a disponer de la fracción *i* en el año *t*

El tiempo (años) en que se degrada la mitad del residuo, está dado por la ecuación:

$$t_i = \frac{\ln(2)}{k_i}$$

El metano efectivamente captado está dado por la ecuación:

$$C_{CH_{4,n}} = \mu_n . G_{CH_{4,n}}$$

Donde:

$C_{CH_{4,n}}$: volumen de metano captado en el año de proyección *n* [Nm^3/año]

μ_n: eficiencia de captación durante el año *n*

Los parámetros del modelo dependen de algunas características específicas de cada sitio de disposición, que además no son uniformes dentro del mismo relleno, como por ejemplo la temperatura, humedad, composición, edad, estructura y tipo de cobertura.

El modelo asume algunas simplificaciones de la realidad que deben ser tenidas en cuenta para su correcta aplicación:

- El relleno no acumula biogás, lo que se genera se emite.
- Se proyectan caudales medios anuales, por lo que no es conveniente comparar con datos de la realidad a corto plazo.
- No hay cantidades relevantes de residuos industriales con características físico-químicas muy diferentes a las de los RSU, que puedan alterar la generación de metano.
- Los residuos comienzan a degradarse luego del primer año de su disposición en el relleno.
- La humedad media del macizo de residuos es homogénea. La realidad es que hay variaciones en los niveles de humedad en la época seca, y los líquidos dentro del relleno tienden a fluir hacia los pozos de captación.

F_{CH_4}: fracción en volumen del metano en el biogás. En rellenos sanitarios este parámetro se encuentra alrededor del 45 – 60 %, tomando usualmente como valor por defecto el 50 %.

μ_n: depende de la distancia entre pozos y drenes de captación, la presión de succión, la impermeabilidad de la tapada final y el porcentaje de cobertura de dicha tapada (si existen sectores sin tapada). En rellenos con tapada de tierra natural, la impermeabilidad es muy sensible a la humedad, por lo que este parámetro está fuertemente relacionado con las precipitaciones. Al depender también de los niveles de succión en las instalaciones con pozos de regulación manual la eficiencia depende de la buena gestión del operador. El rango de variación de este parámetro se encuentra entre el 50 – 90 %.

Radio de influencia de los pozos de captación: se puede definir a través del radio medio de un cilindro con eje en el pozo, que determina un volumen dentro del cual el 90 % del biogás generado es captado por el pozo. Depende de diversos factores como: presión de succión del pozo, volumen de generación de biogás, densidad y permeabilidad del residuo, saturación, presencia del líquido. Determinar dichos parámetros no es sencillo, además de que no son uniformes dentro del relleno, ni simétricos respecto al pozo, ni permanentes en el tiempo. Por ello, es habitual que el radio de influencia sea determinado empíricamente. Por otro lado, una regla práctica sugiere que el radio varía entre 1 y 1.5 veces la profundidad del relleno, dependiendo fuertemente de la permeabilidad de la tapada final.

El caudal captado de biogás está dado por:

$$C_{B_n} = \frac{C_{CH_{4,n}}}{F_{CH_{4,n}}}$$

LandGEM (EPA)

Modelo de primer orden, que estima las emisiones de metano, dióxido de carbono, compuestos orgánicos no metano NMOCs y contaminantes del aire individuales, a partir de los parámetros L_0 y k. Es una herramienta implementada en una planilla de Excel.

LandGEM utiliza la siguiente ecuación para estimar la generación de metano:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-k\, t_{i,j}}$$

Siendo:

Q_{CH4}: la cantidad de metano anual generada en el año del cálculo (m^3/año);

i: el incremento por año;

j: el 0.1 incremento por año;

n: se calcula como: (año del cálculo) – (año de ingreso del residuo);

t_{ij}: es edad de la j^{esima} fracción de residuos dispuestos (M_i) en el año *i.*

Modelo Mexicano

Este modelo fue desarrollado inicialmente en el 2003 por SCS Engineers en un contrato con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la EPA. En el 2009 se actualizó el primer modelo creado, logrando el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0.

El modelo requiere como datos de entrada:

Año de apertura

Año de clausura

Índices de disposición anual

Precipitación promedio anual

Eficiencia del sistema de recolección

Además, provee valores para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial del metano (L_0). Estos valores fueron desarrollados usando datos específicos de SDF representativos de México y la relación entre los valores de k y L_0 observados en los SDF de EE.UU.

El modelo emplea la ecuación de degradación de primer orden:

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^{n} \sum_{j=0,1}^{1} 2kL_0 \left[\frac{Mi}{10}\right] \left(e^{-kt_{ij}}\right)(MCF)(F)$$

Siendo:

Q_{LFG}: el flujo de biogás máximo esperando (m^3/año)

i: incremento en el tiempo de 1 año

n: año del calculo

j: incremento de tiempo en 0,1 años

k: índice de generación de metano ($años^{-1}$)

L_0: generación potencial de metano (m^3/Mg)

Mi: masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)

T_{ij}: edad de la sección j de la masa de residuos Mi dispuestas en el año i (años decimales)

MCF: factor de corrección del metano

F: factor de ajuste por incendios

El modelo asume, por un lado, que el período desde la colocación de los residuos y el comienzo de la generación de biogás es de un año, y por otro que la generación de biogás disminuye exponencialmente.

First Order Decay Method (FOD) (IPPC)[6]

Si bien el IPCC presenta dos métodos para el cálculo de las emisiones de CH_4: el "Default Method" (DM) ya mencionado anteriormente y el FOD, recomienda, siempre que sea posible, aplicar este último. Esto se debe a que refleja las tendencias de las emisiones con mayor exactitud, aunque la cantidad de información necesaria es más compleja, y los valores propuestos en las Directrices del IPCC a veces son insuficientes.

Este modelo tiene en cuenta como factor el tiempo de degradación permitiendo estimar las emisiones anuales en todo el proceso, que puede durar décadas. Debido a esto las estimaciones anuales provenientes de cada método no son comparables.

Para poder aplicar este método es necesario contar con información sobre las cantidades, la composición y las prácticas llevadas a cabo para la disposición de los RS. Sin embargo, las

[6] Fuente: Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 5 – Desechos.

Directrices del IPCC proporcionan valores o métodos por defecto, en función del país o la región que se esté analizando, para así poder estimar de algunos parámetros fundamentales que se requieren para la aplicación del método.

Las Directrices del IPCC presentan el método en tres ecuaciones:

La primera ecuación, que se muestra a continuación, debe utilizarse para un SDF individual, o posiblemente para un grupo de SDF específicos:

$$Q = L_0 \cdot R \cdot \left(e^{-kc} - e^{-kt}\right)$$

La segunda ecuación permite calcular la generación de metano en un año determinado (T) a partir de todos los residuos dispuestos en el RSa durante el año x (R_x)

$$Q_{T,x} = k \cdot L_0 \cdot R_x \cdot e^{-k(T-x)}$$

Si se quiere estimar las emisiones generadas en el año T a partir del material dispuesto en años anteriores y el año en curso se puede aplicar la ecuación anterior para todos los valores de R_x, resultando la siguiente ecuación:

$$Q_T = \sum Q_{T,x}$$

Siendo:

R: Tasa promedio anual de aceptación de residuos durante la vida útil [Mg/año]

L_0: Potencial de generación de metano [Nm^3/Mg]

k: Tasa de generación de metano [$año^{-1}$]

c: Tiempo a partir de la clausura [año]

t: Tiempo a partir de la apertura [año]

$Q_{T,x}$: Cantidad de metano generado en el año T a partir de la cantidad R_x de residuos [Mg]

T: Año actual

x: Año de ingreso de los residuos

Q_T: Total de emisiones en el año T a partir de los residuos dispuestos en los años anteriores, incluyendo el año T.

Sin embargo, el método FOD puede expresarse de manera equivalente mediante las siguientes ecuaciones:

$$CH_4\ generado\ en\ el\ año\ t\ (Gg/año) = \sum_x \left[(A \cdot k \cdot RSU_T(x) \cdot RSU_F(x) \cdot L_0(x)) \cdot e^{-k(t-x)}\right]$$

Siendo:

$$A = \frac{\left(1 - e^{-k}\right)}{k}$$

$$L_0 = FCM(x) \cdot COD(x) \cdot COD_F \cdot F \cdot \frac{16}{12}$$

Con:

x: años respecto de los cuales se deben incorporar datos desde el año inicial hasta t

t: año del inventario

A: factor de normalización que corrige la sumatoria

k: valor constante de la tasa de generación de metano (año^{-1})

RSU_T (x): total de RSU generados en el año x (Gg/año)

RSU_F (x): fracción de los RSU eliminados en los SDF durante el año x

L_0 (x): potencial de generación de metano (Gg CH_4/Gg desechos)

FCM (x): factor de corrección para el metano en el año x (fracción)

COD (x): carbono orgánico degradable en el año x (fracción) (Gg C/Gg desechos)

COD_F: fracción de COD no asimilada

F: fracción por volumen de CH_4 en el biogás generado

16/12: conversión de C a CH_4

$$CH_4 emitido\ durante\ el\ año\ t\ (Gg/año) = [CH_4 generado\ durante\ el\ año\ t - R(t)] \cdot (1 - OX)$$

R (t): CH_4 recuperado durante el año t del inventario (Gg/año)

OX: factor de oxidación (fracción)

Cabe destacar que todos los parámetros del modelo pueden cambiar con el transcurso del tiempo, dependiendo de las tendencias en la disposición de los RS y la gestión del SDF.

Muchos países han realizado ajustes del modelo presentado por el IPCC, incluyendo información complementaria de los factores L_0 y k ya que en las guías no se prevé información internacional suficiente.

En Noruega (1998) se implemento la siguiente ecuación:

$$Q_{T,x} = k \cdot MSW_{T(x)} \cdot MSW_{F(x)} \cdot MCF_{(x)} \cdot L_{0_{(x)}} \cdot e^{-k(T-x)} \cdot F$$

Modelo Multifase IPCC

Es un modelo de primer orden multifase que calcula la cantidad, el contenido de carbono y la constante k de cada tipo de residuos. La variable L_0, no se utiliza explícitamente, ya que calcula las emisiones de metano en toneladas por año a partir de la descomposición de biodegradables de carbono en los residuos

$$BE_{CH4,SWDS,y} = \varphi(1-f)GWP_{CH4}(1-OX)\frac{16}{12}F.DOC_f.MCF\sum_{x=1}^{y}\sum_{j}W_{j,x}.\ DOC_J.e^{-k_j(y-x)}.\left(1-.e^{-k_j}\right)$$

Donde:

$BE_{CH4, SWDF, y}$: generación metano del relleno sanitario.

φ: factor de corrección, que tiene en cuenta las incertidumbres del modelo

f: la fracción de metano capturado en el vertedero

GWP_{CH4}: potencial de Calentamiento Global (GWP) del metano

OX: factor de oxidación, refleja la cantidad de metano del vertedero que es oxidado en el suelo o en el material de cubrición.

F: fracción de volumen de mentano en el gas del vertedero

DOC_f: fracción biodegradable que puede descomponerse

MCF: el factor de corrección de metano

$W_{j,x}$: cantidad de toneladas de residuos orgánicos tipo j dispuesto en el vertedero en el año x

DOC_j: fracción biodegradable (en peso) del tipo de residuos j

K_j: velocidad de disminución para el tipo de residuos j

x: año durante el periodo de acreditación

Muchos de estos parámetros pueden ser determinados mediante tablas según la localización (continente/país).

En el estudio realizado por Willumsen & Terraza (2007), donde se analizaron seis rellenos sanitarios en América del Sur y Europa, se observó que los mejores resultados fueron los entregados por el IPCC Model y el LandGEM.

Modelo Centroamericano de Biogás (EPA)

Este es un modelo multifase de primer orden. En particular considera dos fases una rápida y una lenta asignándoles diferentes valores de k.

Fue elaborado en una planilla de cálculo en Excel en la cual se deben colocar datos específicos del relleno analizado como ser:

El año de apertura y clausura del RSa

Índices de disposición anual

Precipitación promedio anual

Eficiencia del sistema de recolección

Por otro lado el modelo provee automáticamente para el país seleccionado los valores de:

Composición de residuos

Variables k y L_0

Los valores de k y L_0 fueron calculados en base a información recolectada sobre el clima y composición de residuos de rellenos sanitarios representativos de las ciudades en Centroamérica para los países: Nicaragua, México, Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá.

Para el desarrollo del modelo se evaluaron otros modelos como el Modelo Mexicano de Biogás, el Waste Model del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), entre otros. De esta manera, el Modelo Centroamericano incorpora varios conceptos de cada uno de estos modelos para reflejar de la mejor manera las condiciones reales de un SDF.

El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden que asume un periodo de seis meses desde la colocación de los residuos y el comienzo de la generación de biogás y que por cada unidad de residuos, después de seis meses la generación disminuye exponencialmente mientras la fracción orgánica de los residuos es consumida.

El modelo estima la generación de biogás en un año dado usando la siguiente ecuación utilizada por el Modelo Landfill Gas Emissions (LandGEM) de la U.S. EPA versión 3.02 (EPA 2005).

$$Q_M = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} 2kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right)\left(e^{-kt_{ij}}\right)$$

Donde:

Q_M: Generación de biogás (Nm^3/año)

i: Incremento de año 1

n: (Año del cálculo) – (Año en que se dispuso la masa de residuos en cuestión)

j: incremento de 0.1 años

k: índice de generación de metano (1/año)

L_0: Generación potencial de metano (m^3/Mg)

M_i: masa de residuos depositados en el año i

T_{ij}: edad de la sección j de masa de residuos depositados en el año i

Dado que los tiempos de degradación varían según el tipo de residuo, es decir tienen diferentes valores de k. El modelo considera dos categorías de valores de k según si el decaimiento es rápido o lento.

Los residuos de decaimiento rápido incluyen comida y algunos desechos de jardinería ("residuos verdes") y los residuos de decaimiento lento incluye todos los demás residuos orgánicos como residuos de jardinería, papel, textiles, caucho, cuero y huesos.

De no tener información sobre los valores de k o datos sobre la composición de residuos específicos del relleno, el modelo utiliza los valores automáticos ya incluidos. Para cada uno de los nueve países, se calcularon valores de k para decaimiento rápido y decaimiento lento en función de la precipitación que recibe el relleno. El valor de k de 0,23 por año se utiliza como el valor k de decaimiento rápido. Los valores k de decaimiento lento dependen de la composición de residuos.

1.5.4 Estimación de los parámetros

Considerando todas las incertidumbres que involucran a los parámetros en cuestión, podemos decir que su determinación es uno de los desafíos más significantes a la hora de aplicar los modelos.

L_0: potencial de generación de metano

Representa la cantidad específica de metano que puede generar una determinada muestra de residuos. Como es de esperar, esta variable depende principalmente de la composición de los residuos y en particular del contenido orgánico. En teoría no depende de la humedad, pero hay

estudios estadísticos en rellenos de EEUU que limitan el valor de L_0 cuando hay bajas precipitaciones.

En diferentes estudios se determinó que los valores de L_0 pueden varían dentro del rango definido entre 6 - 270 m^3Mg^{-1}. El valor más usual definido por la EPA es de 100 m^3Mg^{-1}.

Una forma de calcular el valor de L_0 es a partir de su composición, determinado la formula química de los residuos.

k: tasa de generación de gas

Esta constante define el lapso de tiempo de la generación de metano a partir del flujo de residuos y depende de las condiciones específicas del sitio como ser el contenido de humedad, temperatura, potencial de oxidación, profundidad, pH, entre otros.

Diferentes organizaciones como la US EPA y el IPCC proponen valores para L_0 y k (ver tabla 4). Por ejemplo, en bibliografía es usual encontrar que el valor de k está acotado entre 0,01 a 0,21 $años^{-1}$ siendo 0,04 $años^{-1}$ el valor más comúnmente utilizado.

Tipo de residuo		Clima templado y boreal seco		Clima templado y boreal húmedo		Clima tropical seco		Clima tropical húmedo	
		Defecto	Rango	Defecto	Rango	Defecto	Rango	Defecto	Rango
Lentamente descomponible	Papel/textiles	0,04	0,03-0,05	0,06	0,05-0,07	0,045	0,04-0,06	0,07	0,06-0,085
	Madera/paja	0,02	0,01-0,03	0,03	0,02-0,04	0,025	0,02-0,04	0,035	0,03-0,05
Moderadamente descomponible	Desechos de jardines/parques u otros elementos orgánicos putrescibles, excluidos los alimentos	0,05	0,04-0,06	0,1	0,06-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,20
Rápidamente descomponible	Alimentos/lodos de efluentes	0,06	0,05-0,08	0,185	0,10-0,20	0,085	0,07-0,10	0,4	0,17-0,70
Residuos a granel		0,05	0,04-0,06	0,09	0,08-0,10	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,20

Tabla 4.- Valores de k [años^{-1}] sugeridos por la IPCC (Machado, 2009)

FCM: Factor de corrección para el metano

Este factor representa el hecho de que los SDF no controlados producen menos CH_4 a partir de una determinada cantidad de desechos en comparación con los SDF controlados. Esto se debe a que la fracción de desechos que se descompone aeróbicamente en las capas superiores de los SDF no controlados es mayor.

No debe confundirse este factor con el Factor de Conversión del Metano (FCM), al que se hace referencia en las Directrices del IPCC en relación con las emisiones procedentes de los efluentes y del manejo del estiércol del ganado.

En la tabla 5 se presentan los valores por defecto del FCM que figuran en las Directrices del IPCC.

Tipo del Sitio de Disposición Final	Valores por defecto del factor de corrección para el metano (FCM)
Controlados[a]	1,0
No controlados - profundos (≥ 5m de desechos)	0,8
No controlados - poco profundos (< 5m de desechos)	0,4
Vertederos no incluidos en ninguna categoría	0,6

[a]En los SDF controlados debe haber un sistema de disposición controlada de los RS (es decir, zonas especificas para depositar los RS, cierto grado de control de la recolección de basuras y algunas medidas de control de incendios) y debe utilizarse alguno de los siguientes elementos: material de cobertura, compactado mecánico o nivelación de los desechos.

[b]El valor por defecto de 0,6 para los Vertederos no incluidos en ninguna categoría puede resultar inapropiado para los países en desarrollo que tengan un alto porcentaje de vertederos no controlados de poca profundidad, ya que probablemente ellos conducirá a sobreestimar las emisiones. Por lo tanto, se exhorta a los organismos encargados de los inventarios en los países en desarrollo a que utilicen como FCM el valor de 0,4 a menos que cuenten con datos documentados que indiquen la existencia en sus respectivos países de prácticas de control de los vertederos.

Tabla 5.-Clasificación de los SDF y factores de corrección para el metano

COD: carbono orgánico degradable

El COD es el carbono orgánico que puede ser descompuesto bioquímicamente. Se basa en la composición de los RS y puede calcularse sobre la base del promedio ponderado del contenido de carbono de los distintos componentes de los desechos, en el caso que se conozca dicho composición.

Aplicando la ecuación a continuación, presentada en las Directrices del IPCC, se puede determinar el COD utilizando valores por defecto del contenido de carbono:

$$COD = (0{,}4 \cdot A) + (0{,}17 \cdot B) + (0{,}15 \cdot C) + (0{,}3 \cdot D)$$

Siendo:

A: fracción de RSU compuesta de papel y textiles

B: fracción de RSU formada por desechos de jardines, desechos de parques u otros elementos orgánicos putrescibles, excluidos los alimentos

C: fracción de RSU compuesta de restos de alimentos

D: fracción de RSU compuesta de madera o paja

En la tabla a continuación se presentan los valores por defecto del COD (o DOC, según sus siglas en inglés) que figuran en las Directrices del IPCC.

	Composición	Porcentaje DOC (en peso)
A	Papel y textiles	40
B	Residuos de jardín y otros orgánicos (sin incluir residuos de comida)	17
C	Residuos de comida	15
D	Madera y ramas	30

Tabla 6.- Valores por defecto de DOC, IPCC

COD_F: fracción de carbono orgánico degradable no asimilado

El valor del COD_F es una estimación de la fracción de carbono que se degrada y refleja el hecho de que parte del carbono orgánico que se encuentra en los SDF no se degrada, o lo hace muy lentamente.

Las Directrices del IPCC proponen un valor por defecto de 0,77, aunque se han utilizado valores por defecto de 0,5 a 0,6 ya que a veces se sobreestima si se utiliza el primer valor mencionado.

F: fracción de CH_4 en el biogás

El biogás producido en los SDF está principalmente compuesto de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Por lo general de considera que la F toma un valor de 0,5, pero puede variar entre 0,4 y 0,6, dependiendo de varios factores, entre ellos la composición de los desechos.

R: recuperación de metano

Es la cantidad de CH_4 generado en el SDF que se recupera y se quema en una antorcha o en algún dispositivo de recuperación de energía. El CH_4 que se recupera y luego se utiliza para su venta no entra dentro de la clasificación anterior.

El valor por defecto utilizado es 0.

OX: factor de oxidación

Este factor refleja la cantidad de CH_4 procedente del SDF que se oxida en el suelo o en otros materiales que cubren los desechos. Si el valor de OX es 0, esto significa que no hay oxidación, por el contrario si vale 1 entonces el 100 % del CH_4 es oxidado.

El valor por defecto establecido en las Directrices del IPCC es 0, sin embargo estudios realizados demuestran que los rellenos sanitarios tienen a presentar valores de oxidación superiores que los SDF no controlados. Por ejemplo, el factor de oxidación en SDF cubiertos con material grueso y bien aireado puede ser muy diferente al de los vertederos no cubiertos o en los que se pueden producir escapes de grandes cantidades de CH_4 a través de grietas en el material de cobertura. Aún así, los resultados de los estudios de campo y de laboratorio pueden conducir a la sobreestimación de la oxidación en el suelo de los SDF cubiertos.

Los países más industrializados, que controlan debidamente los SDF, utilizan un valor de 0,1; en los países en desarrollo, los cuales tiene prácticas de control menos avanzadas, el valor medio se encuentra más cercano a 0.

2 Análisis de las tendencias mundiales

2.1 Tipos de tratamientos para los residuos sólidos

A continuación se presentan diferentes tecnologías utilizadas a nivel mundial para tratar los RS.

2.1.1 Vitrificación

Es el proceso de conversión de un material en un sólido amorfo similar al vidrio. Esto se logra por medio del calentamiento o enfriamiento muy rápido o mediante la mezcla con un aditivo.

2.1.2 Biodrying

Proceso por el cual los residuos biodegradables se calientan rápidamente a través de las etapas iniciales de compostaje para eliminar la humedad, reduciendo su peso total. Durante el proceso las tasas de secado se ven aumentadas por el calor biológico, además de la aireación forzada. Esto permite reducir los costos de disposición final.

2.1.3 Tratamiento Mecánico-Biológico

Es una tecnología para el pretratamiento de los residuos sólidos y de manejo especial. El objetivo es eliminar las emisiones atmosféricas y los lixiviados, así como estabilizar y reducir el volumen de los RS destinados a disposición final.

Los residuos entregados son sometidos primero a un tratamiento mecánico y de homogenización, donde parte de ellos son recuperados para su posterior reciclaje y la fracción orgánica es estabilizada mediante tratamiento biológico. La degradación puede ser llevada a cabo mediante digestión aerobia (compostaje) o anaerobia. A su vez, también se puede utilizar la descomposición en 2 etapas, una primera instancia anaerobia y luego aerobia, hasta que los residuos alcancen las características apropiadas para proceder al relleno sanitario.

2.1.4 Autoclavado de residuos sólidos urbanos

Se utiliza el calor, vapor y la presión de un autoclave industrial para el tratamiento de los residuos. El vapor de agua saturado se bombea hacia el autoclave a temperaturas de alrededor de 160 °C, y la presión se mantiene a 5 bar, para así eliminar todo tipo de microorganismos. El proceso reduce el volumen de los residuos en un 60 %.

En particular, algunos tipos de tratamiento con los cuales se puede obtener energía son:

2.1.5 Biodigestión

Mediante un proceso de digestión anaerobia se descompone la fracción orgánica presente en los residuos generando una cantidad importante de gas metano, además de dióxido de carbono, algo

de nitrógeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. El gas generado puede ser utilizado para calefacción o en generadores eléctricos.

2.1.6 Incineración Convencional

Tratamiento térmico de los RSU mediante la utilización de altas temperaturas por oxidación completa. Como producto final se obtienen gases de combustión, efluentes líquidos y cenizas. Las plantas que buscan recuperar energía, utilizan el calor producido en las calderas para generar vapor y así mover una turbina generadora de electricidad. Si bien con los años se ha logrado mejorar las tecnologías y disminuir los impactos ambientales estas plantas siguen teniendo un fuerte rechazo en muchas sociedades por ser fuentes de contaminación.

2.1.7 Co-incineración (plantas térmicas o cementeras)

En algunas plantas de fabricación, que tienen procesos de combustión, como por ejemplo las plantas térmicas y cementeras, han comenzado a sustituir combustibles, como el carbón, por residuos urbanos. Para ello se realiza la separación mecánica de los residuos para obtener un subproducto más homogéneo, denominado CSR (Combustible Sólido Recuperado). Dentro de las ventajas se destaca el remplazo de los combustibles fósiles, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y sustancias tóxicas. Sin embargo, comparte muchos de los problemas que presentan las plantas de incineración convencional.

2.1.8 Gasificación, pirólisis y arco de plasma

Las tecnologías de incineración por etapas o ATT (Tratamientos Térmicos Avanzados, por sus siglas en inglés) como la pirólisis, la gasificación y el arco de plasma, calientan los residuos a altas temperaturas en ambientes con baja presencia de oxígeno, generando residuos gaseosos, sólidos y líquidos que luego se someten a combustión.

Las principales diferencias entre estas tecnologías son los distintos niveles de temperatura que se alcanzan y la cantidad de oxígeno presente en el proceso.

La gasificación es la descomposición termoquímica de un material por oxidación parcial, utilizando cantidades limitadas de oxígeno. Las temperaturas, por lo general, se encuentran por encima de los 750°C y el contenido de oxígeno es de un 25 – 30 % del oxígeno necesario para la oxidación completa. En particular, la fracción orgánica es transformada en un gas combustible de bajo poder calorífico.

La pirólisis trabaja sin oxígeno y a temperaturas que oscilan entre 250 – 700 °C. En algunos casos se agrega un arco de plasma para alcanzar mayores temperaturas y así obtener un gas de mejor calidad y con menor cantidad de sustancias tóxicas.

La gasificación por plasma es una tecnología de tratamiento de residuos que utiliza alta temperatura. Este proceso es utilizado para generar electricidad en función de la composición de los residuos de entrada y para reducir los volúmenes de residuos que se envían a los SDF.

2.2 Situación Mundial

2.2.1 América Latina y el Caribe

Según [17] América Latina y el Caribe (ALC) se encuentran altamente urbanizadas, estimándose que un 75 % de sus 500 millones habitantes viven en grandes ciudades. La concentración resultante de los residuos sólidos conduce a problemas en su gestión.

En la mayoría de las ciudades de ALC aún predomina la disposición no controlada de residuos en basurales a cielo abierto, siendo una fuente de contaminación de aguas superficiales y subterráneas y de la atmósfera como consecuencia de la liberación de biogás y otros gases, malolientes o peligrosos.

Las ciudades más desarrolladas de la región han tomado conciencia en los últimos años sobre la temática, comenzando a aplicar prácticas tendientes a mejorar la disposición final de los residuos. Sin embargo sólo el 23 % de la cantidad total de residuos recogidos actualmente son eliminados de manera ambientalmente segura en rellenos sanitarios.

La región concede, en general, una escasa importancia hacia las políticas ambientales, con muy poca inversión económica. Por el contrario, países desarrollados han destinado importantes recursos financieros a la gestión ambiental, con resultados ampliamente positivos.

La gestión ambiental en la mayoría de los países latinoamericanos se desarrolla a expensas de la cooperación internacional. El mercado de tecnologías limpias, sistemas de tratamiento y reciclaje, energías alternativas, entre otros, se encuentran limitados. En contraposición, en los países desarrollados las tecnologías y servicios ambientales han crecido significativamente y se han convertido en exportadores.

Sin embargo, el reciclaje ha sido un área de desarrollo, debido a las características propias del subdesarrollo latinoamericano, en las cuales se generan grupos más desfavorecidos que utilizan como fuente de materia prima parte de los residuos sólidos para la pequeña industria y la artesanía, aunque las situaciones de recuperación se encuentran muy por debajo de lo que es considerado como socialmente aceptable.

Dentro de las debilidades de los países latinoamericanos se destaca la falta de prioridad hacia la investigación y desarrollo tecnológico. Por el contrario los focos de interés se basan en nuevos mercados para recursos naturales, productos agrícolas y espacios turísticos, además del bajo nivel de capacitación frente a temas ambientales tanto a nivel de carreras técnicas como en posgrados.

Los sectores privados deben seguir el ejemplo de los países industrializados, asumiendo un papel más activo en los temas referentes a protección ambiental debido a las complicaciones que enfrentan los gobiernos. Las empresas deben adquirir un compromiso frente a la preservación, protección y restauración de los recursos públicos. Por otro lado, al Estado le corresponde definir reglas, apoyar técnicas y financiar a los sectores productivos para que mejoren su desempeño ambiental, así como controlar y fiscalizar.

En cuanto a normativa, en general es muy dispersa, con carencia de criterios básicos y además poco cumplimiento de la legislación de cada país. Existen leyes antiguas sobre cuidado y protección de la salud humana pero no de los ecosistemas. Es necesario que las leyes no sólo consideren la protección del ambiente en su conjunto, sino también las interrelaciones con los aspectos económicos y sociales.

La educación y el conocimiento son elementos centrales del desarrollo productivo y de innovación. En 1992 en la Agenda 21 adoptada en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, en su cap. 36 sobre la "Promoción de la Educación, la Conciencia Pública y la Capacitación", se estableció la relación crítica entre la educación y el desarrollo sustentable, y se planteó avanzar en 3 áreas:

- Reorientar la educación para lograr un desarrollo sustentable.
- Aumentar la conciencia pública.
- Promover la capacitación.

La tendencia actual es:

- Incorporar el concepto de desarrollo sustentable en los planes y programas educativos de todos los niveles.
- Otorgar gran importancia al papel de los medios de comunicación en la educación de la población.
- Servirse de nuevas tecnologías de difusión para alcanzar una mayor penetración de la educación.
- Formar redes de organizaciones no gubernamentales que apoyen los programas educativos.
- Establecer nuevas relaciones y compromisos con la industria y el mundo de los negocios para que apoyen los programas educativos.

2.2.2 Argentina

La política que promueve el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires a partir de la Ley 1.845 "Basura Cero" promulgada en Enero del 2006 y reglamentada en Mayo del 2007 respecto a la gestión de los RSU, está orientada a la eliminación progresiva de los rellenos sanitarios.

"*Basura Cero*" plantea la adopción de medidas dirigidas a la reducción de la generación de residuos, la recuperación y el reciclado así como también la disminución de la toxicidad de la basura y la asunción de la responsabilidad del fabricante sobre sus productos.

Ley 1.854 "Basura Cero"

Art. 2°: *"Se entiende como concepto de "Basura Cero", en el marco de esta norma, el principio de reducción progresiva de la disposición final de los residuos sólidos urbanos, con plazos y metas concretas, por medio de la adopción de un conjunto de medidas orientadas a la reducción en la generación de residuos, la separación selectiva, la recuperación y el reciclado."*

Art. 3°: *"A los efectos del debido cumplimiento del art. 2° de la presente ley, la autoridad de aplicación fija un cronograma de reducción progresiva de la disposición final de residuos sólidos urbanos que conllevará a una disminución de la cantidad de desechos a ser depositados en rellenos sanitarios. (…)"*

Tomando como línea de base la cantidad de 1.497.656 toneladas de residuos enviados a relleno sanitario durante el 2004, las metas de reducción a cumplir son:

- 30 % para el año 2010
- 50 % para el año 2012
- 75 % para el año 2017
- Se prohíbe la disposición final de materiales tanto reciclables como aprovechables para el año 2020.

La cantidad de toneladas máximas a ser dispuestas en rellenos sanitarios, son las siguientes:

Cantidad de toneladas máximas		
Toneladas máximas a ser dispuestas en relleno sanitario – Año 2010	Toneladas máximas a ser dispuestas en relleno sanitario – Año 2012	Toneladas máximas a ser dispuestas en relleno sanitario – Año 2017
1.048.359	748.828	374.414

Tabla 7.- Toneladas máximas a ser dispuestas

De acuerdo a los datos provenientes de la CEAMSE (Coordinadora Ecológica Ambiental Sociedad del Estado), operadora de los rellenos sanitarios, durante el 2013 y en solo un año se logró disminuir casi un 30 % los residuos sólidos urbanos que son enterrados. Sin embargo, como la generación de residuos continúa creciendo, en el año 2014 el porcentaje de cumplimiento de la ley alcanzó apenas el 15 % (el porcentaje se calcula respecto a la cantidad de toneladas enterradas en el 2004, que fueron 1.497.656; en el 2014 se enterraron 1.279.337 toneladas).

Actualmente el Gobierno se encuentra construyendo dos nuevas plantas de Tratamiento Mecánico Biológico (MBT) (ver sección 3.1.3), que se sumarían a las ya existentes en el relleno sanitario Norte III desde el 2013.

Sin embargo, a través de este tipo de proceso solo se logra recuperar parte de los materiales aprovechables (entre un 5 – 10 %), ya que los distintos residuos se han mezclado previamente, no siendo separados desde el origen. En consecuencia, la calidad de los materiales recuperados es

baja, lo cual dificulta o imposibilita su reciclaje posterior, provocando que la mayor parte de los residuos que entran a las plantas de MBT vayan a parar igualmente a disposición final.

La disposición final de residuos en la ciudad de Buenos Aires ha sufrido altibajos durante las últimas dos décadas con cierta tendencia a la baja en los últimos años, como se puede apreciar en la Figura 2.

Sumado a las plantas MBT, se instalaron plantas de tratamiento de neumáticos y de ROC (Residuos de Obras Civiles).

Se destaca que si bien se han presentado diversas críticas con respecto a la instalación de las plantas MBT y a las deficiencias en la separación desde el origen, las cantidades de residuos destinadas a disposición final han disminuido, lo cual es altamente positivo.

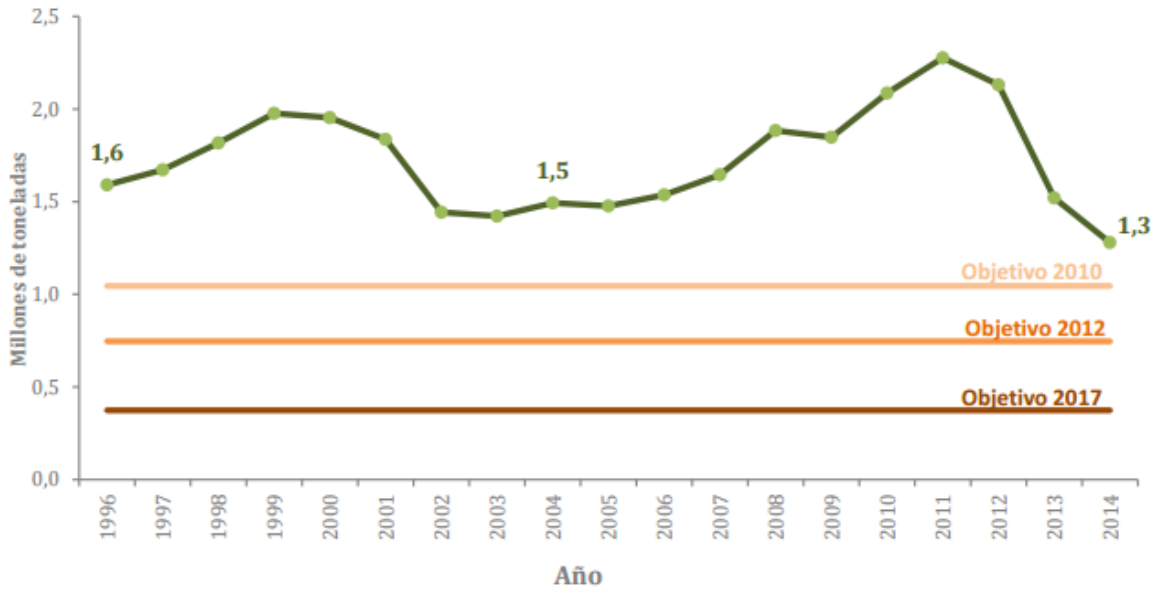


Gráfico 2.-Residuos destinados a disposición final en la Ciudad de Buenos Aires, 1996-2014

La tecnología MBT es más apropiada, cuando ya se ha avanzado en las primeras etapas de la jerarquía (reducción de la generación, reutilización, reciclaje). En Europa el impulso de la tecnología MBT ha sido motivada por la Directiva Europea de Vertido de Residuos (1999/21/EC) y por normativas propias de los estados miembros, que limitan o prohíben la cantidad de residuos biodegradables que se pueden destinar a disposición final. Estos países han tenido una gran trayectoria en materia de gestión de residuos, donde la recolecta selectiva es generalizada, como se puede observar en la tabla 8.

País	% de recolección separada de residuos	Nº de plantas MBT en funcionamiento
Austria	56%	15
Alemania	65%	45
Italia	40%	100
España	30%	86

Tabla 8.- Plantas MBT en funcionamiento y % de reciclaje

2.2.3 Brasil

En Brasil existe una Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), establecida por la ley 12.305 el 2 de agosto del 2010. La misma contiene herramientas importantes que permiten el progreso necesario para hacer frente a los principales impactos ambientales, sociales y económicos de la gestión inadecuada de los residuos sólidos.

La PNRS promueve la reducción de la generación de residuos a través de prácticas de consumo sustentables y un conjunto de herramientas para facilitar un mayor reciclaje y la reutilización de los RSU, así como también, la eliminación ambientalmente segura de los residuos que no pueden ser reciclados o reutilizados.

Asimismo crea importantes metas, que contribuyen a la eliminación de los vertederos no controlados. En el Art. 54 de la PNRS se establece un plazo de cuatro años después de la fecha de publicación de la ley para la implantación de una disposición final de residuos de forma ambientalmente adecuada.

Dadas las dificultades asociadas con la baja institucionalidad de la mayoría de los municipios para la gestión adecuada de los RSU, el gobierno federal ha dado apoyo financiero a los proyectos con miras de gestión sustentable.

Por otro lado, el Art. 30 de la PNRS establece la logística inversa como uno de los instrumentos de implementación de la responsabilidad compartida. La logística inversa es el proceso de planificación, ejecución y control del flujo de materias primas y productos terminados desde el punto de consumo hasta el origen, con el objetivo de recuperar su valor o realizar su adecuada disposición. De esta manera, establece la necesidad de crear canales inversos de manera económicamente viable y sostenible.

Los principales residuos comprendidos en la obligatoriedad de la PNRS son: los envases de agrotoxicós; lámparas fluorescentes, de vapor de sodio y mercurio, neumáticos y productos electrónicos.

La PNRS también define una recogida selectiva de residuos previamente separados de acuerdo su composición, debiendo ser implementada por municipios como forma de encaminar las acciones destinadas al principio de jerarquía en la gestión de residuos.

Según la encuestadora ABRELPE, al 2014 aproximadamente 3600 municipios, de un total de 5570 (es decir el 64 %) presentan iniciativas de recogida selectiva, así como también el 58,4 % de los municipios en Brasil disponen sus residuos de manera ambientalmente adecuada en rellenos sanitarios.

Al comparar estos datos con los del 2010, se observa que la evolución en el país ha sido bastante lenta: el porcentaje de residuos enviados a rellenos sanitarios se mantuvo prácticamente sin cambios en los últimos años, siendo de 57,6 % en 2010 y 58,4 % en el 2014.

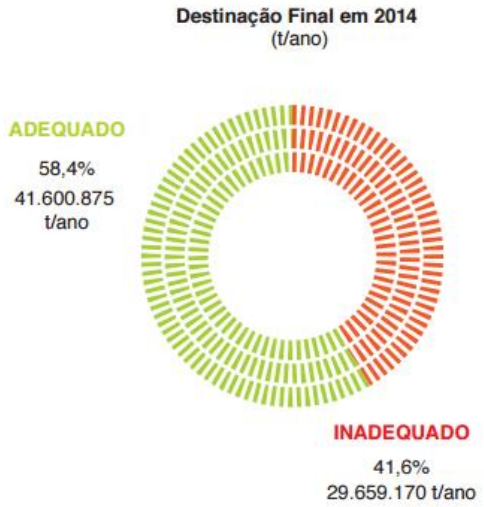


Gráfico 3.- Porcentaje de disposición final en Brasil, 2014

Por otro lado se observaron resultados positivos en la implementación de la logística inversa. Cabe destacar como ejemplo los envases de agrotóxicos, que en el 2010 aproximadamente el 73 % eran dispuestos de forma ambientalmente correcta y en 2014 el porcentaje creció al 94 %, transformando a Brasil en un líder y referencia a nivel mundial en el asunto.

2.2.4 Europa

En la Directiva 2008/98 del Parlamento Europeo y del Consejo del 19 de noviembre de 2008 se establece respecto a la reutilización y reciclado que:

"*Los Estados miembros tomarán las medidas que procedan para fomentar la reutilización de los productos y las actividades de preparación para la reutilización, promoviendo el establecimiento y apoyo de redes de reutilización y reparación, el uso de instrumentos económicos, los requisitos de licitación, los objetivos cuantitativos u otras medidas. Los Estados miembros tomarán medidas para fomentar un reciclado de alta calidad y, a este fin, establecerán una recogida separada de residuos, cuando sea técnica, económica y medioambientalmente factible y adecuada, para cumplir los criterios de calidad necesarios para los sectores de reciclado correspondientes.*"

Con el fin de cumplir con dichos objetivos se adoptan las siguientes medidas

a) *"antes de 2020, deberá aumentarse como mínimo hasta un 50 % global de su peso la preparación para la reutilización y el reciclado de residuos de materiales tales como, el papel, los metales, el plástico y el vidrio de los residuos domésticos y posiblemente de otros orígenes en la medida en que estos flujos de residuos sean similares a los residuos domésticos";*
b) *"antes de 2020, deberá aumentarse hasta un mínimo del 70 % de su peso la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, incluidas las operaciones de relleno que utilicen residuos como sucedáneos de otros materiales, de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones"*

Según el informe publicado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) del 2013, realizado para 32 países Europeos, en el período 2001-2010 se evidencia un cambio en la jerarquía de la gestión viéndose desplazada la disposición final por el reciclaje y la incineración (valorización energética), como se muestra en el gráfico 4.

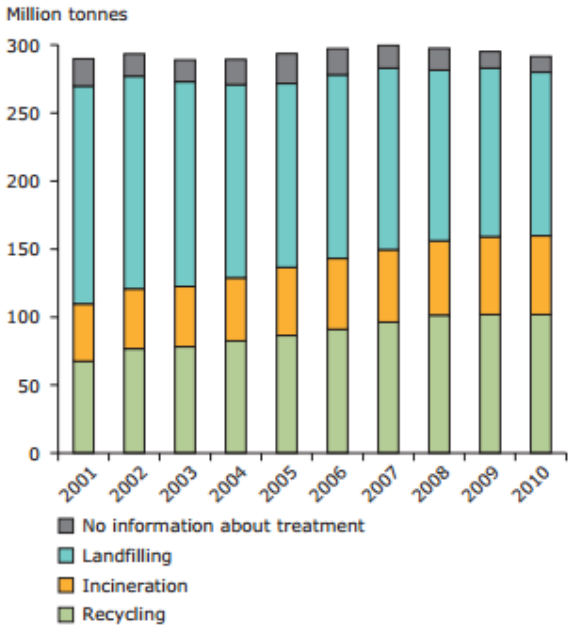


Gráfico 4.- Evolución de la gestión de residuos en 32 países Europeos, 2001-2010

Respecto al reciclaje de los residuos urbanos, en el gráfico 5, se presenta una comparación de los países Europeos analizados en 2001 y 2010, el porcentaje de reciclaje total incluye el reciclaje de los materiales, así como el compostaje y la digestión de biorresiduos[7].

[7] Biorresiduos se definen en la Directiva marco de residuos como "biodegradable de jardines y parques, residuos de alimentos y residuos de cocina" (UE, 2008).

En ese período, 12 países aumentaron su reciclaje el rendimiento en más de diez puntos porcentuales, mientras que 10 registraron un aumento de entre el cinco y diez puntos porcentuales. Por lo tanto se observan mejoras significativas en el rendimiento del reciclaje, sin embargo los números también muestran grandes diferencias en el rendimiento entre los países con los niveles más bajos de reciclaje y los más altos.

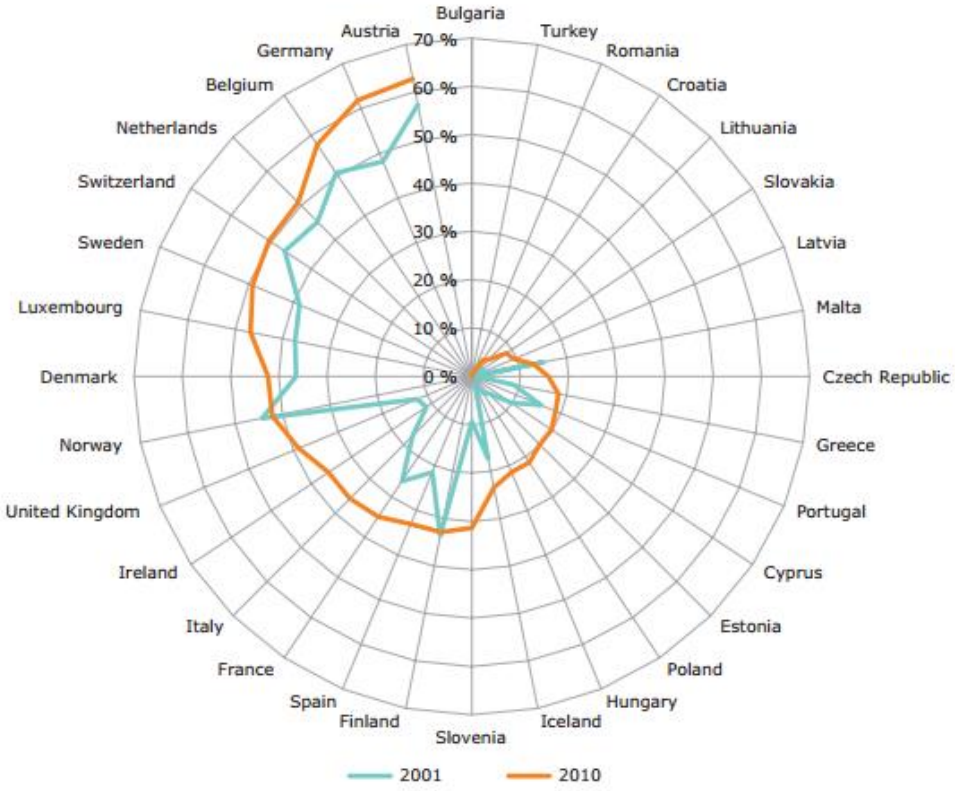


Gráfico 5.- Porcentaje de reciclaje por país, 2001-2010

Se observa en el gráfico 6, que en respuesta al aumento considerable de reciclaje de los residuos urbanos, el porcentaje destinados a disposición final presenta una disminución. Dieciséis países alcanzan una reducción de más del 10%, dentro de los cuales cinco de ellos logran una disminución del 20%

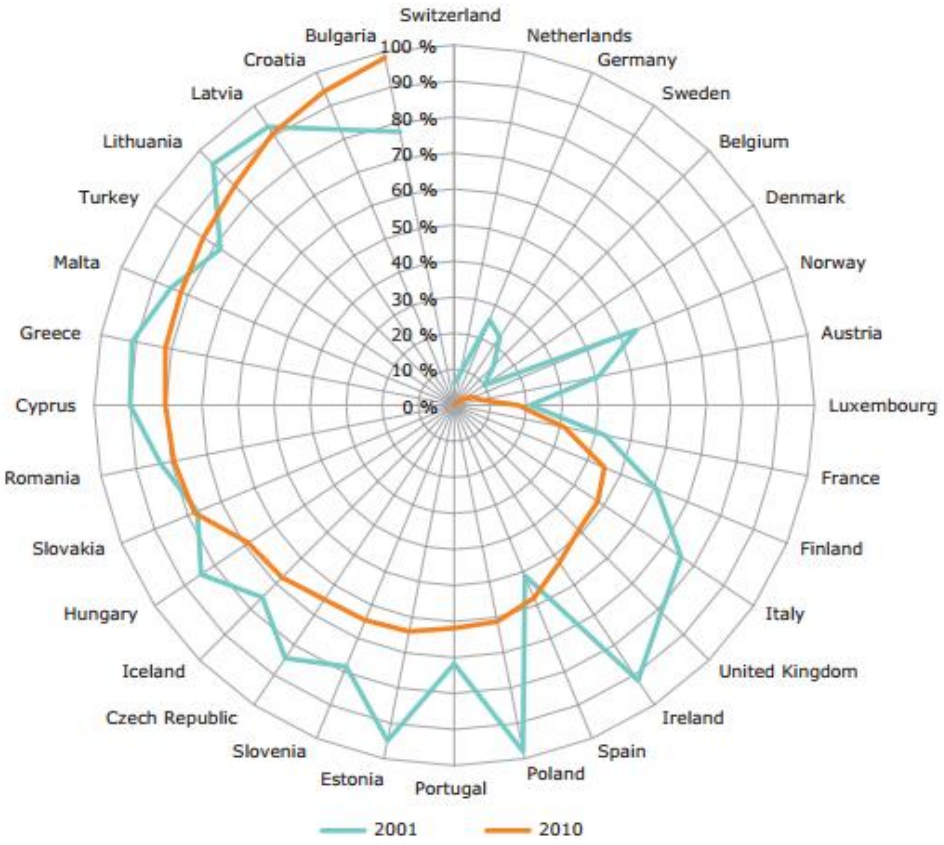


Gráfico 6.- Porcentaje de residuos destinados a disposición final por país, 2001-2010

De acuerdo a la Directiva sobre vertederos de la UE (UE, 1999) todos los Estados miembros de la UE deben reducir la cantidad de residuos biodegradables destinados a disposición final. Dicha Directiva también incluye objetivos a largo y mediano plazo. En particular, en 2006 los países deben reducir al 75%, en 2009 un 50% y en 2016 un 35% de la cantidad que generaron en 1995. Asimismo, a doce países se les ha otorgado una derogación de cuatro años, lo que significa que deben cumplir con sus objetivos en 2010, 2013 y 2020.

El gráfico 7 muestra el estado de cumplimiento de los países sin período de excepción y el gráfico 8 muestra la situación en los Estados miembros de la UE con un período de excepción.

Para los doce países sin período de excepción, en 2006 todos cumplieron con el objetivo propuesto y en 2009, once de ellos cumplieron con el objetivo. También se destaca que siete países ya han logrado en el año 2010 la meta para el 2016.

Para los países con período de excepción, la situación ha sido diferente, según los datos presentados en el informe más de la mitad de ellos han sido incapaces de reducir suficientemente los residuos biodegradables destinados a disposición final o desarrollar la capacidad suficiente para incineración con recuperación de energía.

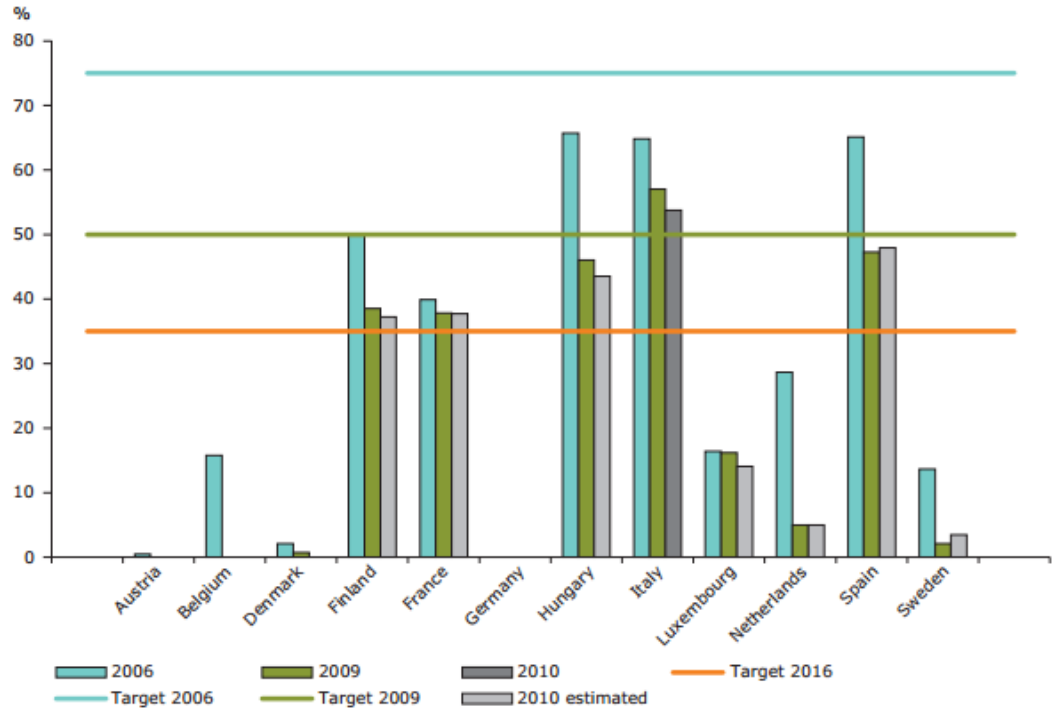


Gráfico 7.- Porcentaje de la fracción biodegradable destinada a la disposición final en comparación con la cantidad generada en 1995, para países sin excepción

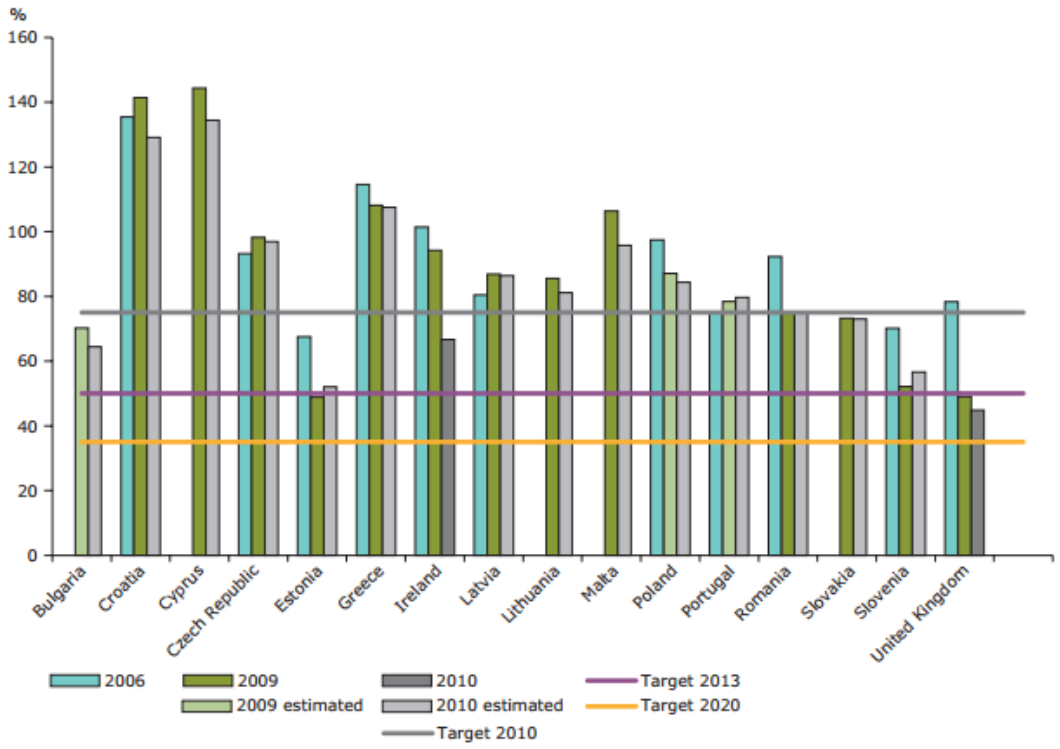


Gráfico 8.- Porcentaje de la fracción biodegradable destina a disposición final en comparación con la cantidad generada en 1995, para países con excepción

2.2.5 Japón

Debido en gran parte a la escasez de terreno, la disposición de los RSU en rellenos sanitarios se ve limitada. Es por esto que el método de tratamiento más empleado es la incineración. Desde aproximadamente 1960, Japón comenzó a gestionar sus RSU por incineración, y en la actualidad, posee las principales instalaciones de incineración de residuos a nivel mundial.

En particular el 80 % de los RSU son incinerados. Este tipo de tratamiento se ha adoptado en forma intensiva, construyéndose cientos de incineradores en todo el país.

Hoy en día se están introduciendo tecnologías con alto nivel de conservación del medio ambiente, eficiencia energética y de operación segura. Con este tipo de instalaciones, la incineración ha ganado confianza en los habitantes, que conviven con este tipo de instalaciones en zonas urbanas y residenciales. Como por ejemplo la planta de incineración de Shibuya ubicada en Tokio, una zona de gran densidad urbana que tiene una estricta regulación de emisión de gases.



Figura 2.- Planta de incineración Shibuya, Tokio

Uno de los principales problemas de la incineración de residuos son las emisiones generadas, con el fin de reducirlas hasta niveles aceptables, se han desarrollado muchos estudios, que derivaron en el desarrollo y muchas tecnologías que mejoraron considerablemente la operación de dichas plantas

Los estudios han demostrado que las dioxinas que se producen por la combustión incompleta de los residuos, en consecuencia se han tomado medidas para prevenir y reducir la generación de dioxinas a través de la combustión completa en el horno.

Otras medidas adoptadas incluyen el enfriamiento para evitar que la re síntesis de dioxina, la aplicación de filtros de mangas para eliminar completamente la dioxina contenida en el humo y el desarrollo del carbón activado, que adsorba y elimina las dioxinas en los gases de escape.

2.2.6 Estados Unidos

Según el informe "Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United Satates: Facts and Figures for 2012" de la U.S. EPA, en las últimas décadas, la tasa de reciclado ha aumentado desde menos del 10 % de los RSU generados en el 1980 a más del 34 % en el 2012.

Respecto a la disposición final, la eliminación en RSa disminuyó de un 89 % de los RSU generados en 1980 a aproximadamente 54% en 2012

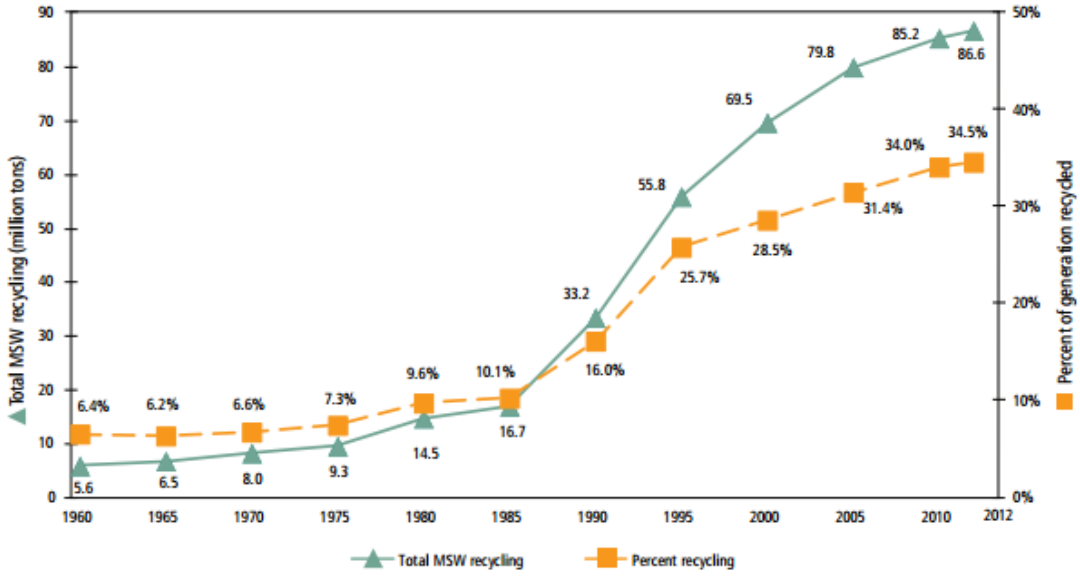


Gráfico 9.- Porcentaje de los residuos sólidos reciclados

	2012 (Millones de toneladas)	2012 (Porcentaje)
Generación	251,6	
Materiales recuperados	86,6	34
Valorización energética	29,3	12
Disposición final	135,7	54

Tabla 9.- Generación de residuos en el 2012

Actualmente hay 86 instalaciones en los Estados Unidos para la combustión de los residuos sólidos urbanos (RSU), con recuperación de energía. Estas instalaciones están ubicadas en 25 estados, principalmente en el noreste.

Dichas instalaciones tienen capacidad para producir 2.720 MW de energía por año mediante el procesamiento de más de 28 millones de toneladas de residuos al año. De acuerdo al informe de la EPA el 12% de los RSU se valorizan energéticamente. Sin embargo cabe destacar que la valorización energética ha disminuido de unos 34 millones de toneladas en 2000 a 28 millones de toneladas en 2012.

Luego de la recuperación energética, aproximadamente el diez por ciento del volumen permanece como la ceniza. Esta ceniza se envía generalmente a RSa.

3 Situación en el Uruguay

3.1 Marco Normativo

A continuación se presenta el actual marco legal Nacional asociado a la gestión de residuos sólidos, compuesto por leyes y normativas que abarcan algunos de los temas relacionados de relevancia para este trabajo.

3.1.1 Residuos peligrosos: Ley Nº 17.220 de 1999

Prohíbe la introducción en cualquier forma o bajo cualquier régimen en las zonas sometidas a la jurisdicción nacional, de todo tipo de desechos peligrosos. Entendiéndose por tal: *"Aquellos desechos cualquiera sea su origen, que por sus características físicas, químicas, biológicas o radiactivas, constituyan un riesgo para la salud humana, animal, vegetal o para el medio ambiente"*

3.1.2 Residuos sanitarios: Decreto 586/2009

El Decreto establece que todo generador de este tipo de residuos deberá contar con un plan de gestión que comprenda al manejo intrainstitucional, el transporte, tratamiento y la disposición final en forma adecuada para la salud y el ambiente conforme a lo previsto en el Decreto.

Aplicación

El Decreto es aplicado a "*las personas físicas o jurídicas, públicas o privadas que presten servicios de salud humana o animal e igualmente a las que generen, identifiquen, separen, desactiven, empaquen, recolecten, transporten, almacenen, manejen, recuperen, transformen, traten y dispongan finalmente los residuos sanitarios y similares en desarrollo de las actividades, manejo e instalaciones relacionadas con:*

a) Prestación de servicios de salud, incluidas las acciones de promoción de la salud, prevención de la enfermedad y diagnóstico precoz.
b) Tratamiento y rehabilitación, la docencia e investigación con organismos vivos o con cadáveres, bioterios, laboratorios e Institutos de Biotecnología relacionados con la salud humana y animal.
c) Morgues.
d) Consultorios, Clínicas, Farmacias, Centros de Pigmentación y/o Tatuajes.
e) Laboratorios y Clínicas Veterinarias.
f) Centros de Zoonosis y Zoológicos."

Clasificación

Los residuos sanitarios contaminados se clasifican en:

a) Infecciosos: aquellos generados durante las diferentes etapas de la atención a la salud (diagnóstico, tratamiento, cirugía, inmunización, investigación, entre otros
b) Punzantes o cortantes: aquellos elementos punzo-cortantes aún cuando se desecharan sin haber sido utilizados
c) Especiales: aquellos que, si bien no han entrado en contacto con agentes infecciosos, constituyen un riesgo para la salud o el ambiente por sus propiedades de corrosividad, reactividad, toxicidad, explosividad, inflamabilidad, irritabilidad y/o radiactividad.
d) Se clasificarán como residuos sanitarios comunes, todos aquellos que no queden comprendidos en ninguna de las categorías establecidas anteriormente, cuyas características sean similares a los residuos sólidos domésticos comunes.

Envasado

Todos los residuos sanitarios deberán ser envasados previo a su recolección y según las condiciones que se detallan en el Decreto. En particular las bolsas deben ser de polietileno virgen y de color rojo con un pictograma de color negro. En las mismas debe estar identificado el generador, la fecha de generación y el lugar de origen.

Tratamiento

El cumplimiento de las disposiciones establecidas en el Decreto para la etapa de tratamiento es controlado por DINAMA.

El tratamiento de residuos sanitarios contaminados deberá efectuarse de acuerdo a las siguientes condiciones:

a) Únicamente podrá realizarse en instalaciones públicas o privadas que hubieran sido autorizadas para la prestación de esos servicios (…).
b) Sólo podrán ser sometidos a tratamiento, aquellos residuos recolectados y transportados por transportistas debidamente autorizados. En ningún caso los residuos a ser tratados pueden quedar en la vía pública o al libre acceso por terceros ajenos al personal asignado para su manejo.
c) El personal deberá contar con la indumentaria y con los elementos de higiene y protección personal correspondientes, así como haber recibido las instrucciones necesarias para el adecuado manejo de residuos, sin entrar en contacto directamente con los mismos, durante su descarga y tratamiento.
d) *Implementar sistemas de control de las operaciones, mediante registros de entradas y salidas de vehículos y cargas y partes diarios de los procesos, que en todos casos permitan identificar y acreditar el origen,la cantidad y el transportista de los residuos; la fecha y la*

hora del retiro, la entrega y el procesamiento de los mismos; y, todo otro dato relevante para el servicio (Trazabilidad).

e) *Posibilitar el lavado y la desinfección de los vehículos utilizados para el transporte de los residuos, después de cada descarga y antes de abandonar las instalaciones de tratamiento.*
f) *Contar con planes de contingencia para el caso de deficiencias o accidentes en la prestación del servicio.*
g) *Mantener las instalaciones y el cumplimiento de las operaciones, en forma adecuada*
h) *Para todos aquellos tratamientos de residuos sanitarios, distintos de la esterilización por autoclavado y a la incineración, deberá contar con un valor de probabilidad de muerte de 99,99%, además de las especificaciones que puedan indicarse por el Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, en acuerdo con el Ministerio de Salud Pública.*

También se establecen límites máximos de emisiones a la atmósfera permitidos, para los sistemas de tratamiento basados en tecnologías de incineración,

3.1.3 Residuos baterías plomo ácido: Decreto 373/2003

En el decreto se establecen las condiciones en las que se debe realizar el manejo, la recuperación y la disposición final de las baterías de plomo ácido, de manera que no afecte al medio ambiente. *"Queda prohibido colocar, almacenar, transportar, procesar, abandonar o disponer tales baterías en lugares no habilitados*".

Toda persona física o jurídica, que fabrique, arme, ensamble o importe baterías plomo ácido, deberá elaborar e implementar un plan maestro que comprenda la retornabilidad y destino final de tales baterías, luego de su uso, así como de aquellas que sean desechadas por su tenedor.

Los planes maestros deberán ser presentados para su aprobación ante el MVOTMA y deberán incluir el detalle, la forma y demás condiciones en que se realizará la devolución, la recogida, el transporte, el depósito transitorio y la valorización de baterías y el destino final de cada uno de sus componentes, así como los mecanismos de registro y control necesarios para verificar los resultados del plan.

Toda persona física o jurídica, que distribuya, comercialice, intermedie o venda baterías o acumuladores eléctricos de plomo y ácido, deberá contar con un sistema o centro de recepción, que habilite la devolución de la batería usada o desechada por dicho consumidor, en concordancia con el plan maestro aprobado para el o los fabricantes o importadores que le suministren.

Recuperación y reciclado

Se prioriza frente a la disposición final de las baterías usadas, el tratamiento de las mismas para la valorización de la totalidad de sus componentes mediante los procedimientos de reacondicionamiento o separación que permitan el reciclado de sus componentes, especialmente el plomo, o, la fundición de los materiales que lo contengan.

La fundición de los materiales conteniendo plomo, deberá cumplir con los estándares y niveles admisibles de emisiones atmosféricas que establezca el MVOTMA, según lo previsto en el artículo 17 de la Ley Nº 17.283 de 28 de noviembre de 2000 ("Ley General de Protección al Ambiente") y de acuerdo a las propuestas de GESTA aire.

3.1.4 Envases de agroquímicos y obsoletos: Decreto 152/2013

Aplicación

El decreto comprende la gestión ambientalmente adecuada de los residuos derivados del uso de los productos químicos, biológicos y otros bienes en la actividad agropecuaria, hortifrutícola y forestal, los siguientes:

a) todos los envases de productos químicos o biológicos utilizados en la producción vegetal, o en la producción animal.
b) caravanas y otros elementos que contengan el principio activo impregnado en una matriz plástica.
c) existencias de productos químicos o biológicos utilizados en la producción vegetal o animal que no puedan ser destinados al fin para el que fueron fabricados.

Planes de gestión de residuos de envases

Los planes de gestión de residuos deberán:

a) Contemplar todos los materiales utilizados en los envases y otros bienes comprendidos, estableciendo mecanismos de trazabilidad durante los procesos, incluyendo tanto la gestión ambientalmente adecuada de los envases descontaminados, como de los envases no descontaminados.
b) Adecuarse a las características de la generación de residuos de cada región, implementando gradualmente circuitos de recolección, eficientes y seguros a escala nacional, que permitan incrementar paulatinamente el porcentaje de recuperación y adecuada gestión.
c) Priorizar el reciclaje de los materiales, el reuso de los envases y la valorización energética frente a su disposición final, cuando estas alternativas sean viables desde el punto de vista técnico-económico y social.
d) Prever la integración efectiva de los distribuidores y puntos de venta al consumo, así como la inserción de los grandes usuarios.
e) Establecer la logística de recuperación de los envases y residuos de envases, a través de los centros de recepción y de acopio.
f) Establecer mecanismos de información y difusión permanente.
g) Implementar mecanismos de control y seguimiento de la operativa y del cumplimiento de metas de recuperación.

Estos planes de gestión deberán ser presentados para su aprobación ante DINAMA

Envases descontaminados

El decreto considera envases descontaminados a aquellos *"usados para contener productos solubles en agua, a los cuales se hubiera aplicado el método del triple lavado por el propio usuario u otro método alternativo reconocido, luego del uso o aplicación del producto que contenía".*

Para que este tipo de envases ingrese por el canal limpio del sistema de retornabilidad establecido en el plan de gestión correspondiente, los envases triple lavados deberán además ser inutilizados, mediante la perforación de los mismos, salvo que el plan correspondiente establezca otra cosa. Una vez descontaminados los envases serán considerados residuos no peligrosos.

Residuos no descontaminados

Aquellos envases, cualquiera sea su tipo o material, que no hayan sido descontaminados adecuadamente, deberán ser tratados atendiendo a las sustancias peligrosas que contenga o hubiera contenido, y, almacenados y gestionados en forma separada de los envases descontaminados.

3.1.5 Residuos sólidos industriales y asimilables: Decreto 182/2013

Criterios rectores

- En la gestión de los residuos se priorizará la minimización de la generación en origen frente a cualquier otra alternativa.
- Se promoverán los siguientes procesos: reuso, reciclado y otras formas de valorización de residuos.
- La gestión de residuos tenderá a la búsqueda de los mejores resultados ambientales de alcance general, mediante soluciones integrales, viables y sustentables, desde el punto de vista económico social y ambiental.
- Las distintas etapas de la gestión de residuos sólidos deberán ejecutarse mediante actividades formales, que aseguren el cumplimiento de las condiciones sanitarias y ambientales.

Actividades comprendidas

- Industria manufacturera
- Explotaciones mineras;
- Fraccionamiento o almacenamiento de sustancias y productos peligrosos;
- Cría intensiva de ganado vacuno y tambos;
- Cría intensiva de porcinos;
- Cría intensiva de aves y establecimientos avícolas en producción;
- Prestación de servicios de potabilización o suministro de agua potable;
- Tratamiento de efluentes líquidos;
- Reciclado y/o tratamiento de residuos sólidos de cualquier tipo, con excepción de residuos sólidos hospitalarios o sanitarios;

- Generación, transmisión o distribución de energía eléctrica;
- Prestación de servicios de telecomunicaciones
- Aeropuertos y aeródromos, cualquiera sea su tipo, incluyendo bases aéreas militares;
- Puertos, cualquiera sea su tipo, incluyendo bases militares;
- Zonas francas y parques industriales;
- Comercialización de combustibles;
- Residuos generados durante la atención a derrames de mercaderías peligrosas o emergencias químicas.

Categorías de los residuos sólidos

Serán considerados residuos sólidos de la CATEGORIA I, los que presenten una o más de las propiedades siguientes:

- Sean inflamables, corrosivos o reactivos
- Contengan una o más sustancias, según porcentajes en peso que se establecen en el decreto
- Presenten un riesgo biológico especial, por contener o ser pasibles de contener agentes patógenos o no convencionales, que puedan poner en riesgo la salud de la población o la sanidad animal o vegetal, declarados como tales por la autoridad competente, siempre que dicha declaración hubiera sido comunicada a la Dirección Nacional de Medio Ambiente y publicada en el Diario Oficial
- Cuando el resultado de la aplicación del test de lixiviación alcance determinadas concentraciones establecidas en el Decreto

Serán considerados residuos sólidos de la CATEGORIA II, todos los demás residuos sólidos alcanzados por este reglamento, cuando no presenten ninguna de las características o la composición establecida para la Categoría I

Obligaciones de los generadores

- Contar con un PGR para la totalidad de los residuos generados
- Separar corrientes (por peligrosidad o por gestión)
- Producir y proporcionar información para la categorización
- Llevar registro mensual de cantidades generadas
- Asegurar que las operaciones de gestión a cargo de terceros sea a través de empresas formales con las habilitaciones correspondientes
- Conservar los documentos por 4 años
- Contar con personal idóneo para la gestión

3.1.6 Ley de envases Ley Nº 17.849 de 2004

Ley 17.849 "Uso de envases no retornables": "*queda prohibida la fabricación, importación, comercialización, venta, distribución y entrega a cualquier título, de aquellos productos alcanzados*

por la presente ley, que no se encuentren comprendidos en un plan de gestión o sistema integrado de gestión de los residuos de envases".

Dichos planes serán implementados de forma gradual en circuitos de recolección limpios, eficientes y seguros en todo el territorio nacional, también deberán comprender la formalización de los clasificadores de residuos urbanos.

3.1.7 Decreto 260/2007

En respuesta a los actuales patrones de consumo, basados en la filosofía de usar y tirar, que generan a diario enormes cantidades de residuos, surge el Decreto 260/007 del 23 de julio de 2007 como reglamentación de la Ley Nº17.849 "Uso de envases no retornables" del año 2004.

De esta manera se busca promover el reuso, el reciclaje y demás formas de valorización de los residuos de envases, con el fin de evitar su disposición final. Dichos envases y materiales de empaque de los productos en el mercado representan una importante fracción en la composición de residuos, lo que ha impulsado la búsqueda de soluciones a nivel mundial.

El Decreto 260/2007, es aplicado a *"todos los envases primarios puestos en el mercado cualquiera sea su tipo y material, a excepción de aquellos envases que sean de uso y consumo exclusivo de productos utilizados por actividades industriales, comerciales o agropecuarias, los cuales se regulan por las normas ambientales generales y por la reglamentación específica que se establezca"*

3.2 Interior del País:

En las Fichas Resumen Situación en el Interior del País adjuntas se detalla la situación de los SDF, recolección y clasificación para cada departamento del país, [16].

A modo de resumen, en la tabla 10, se presentan los datos más relevantes que serán utilizados en el posterior análisis de regionalización.

Departamento	Población urbana	Tasa de generación (kg/día/hab)	SDF significativos	Población servida	Carga diaria (t/día)
Artigas	69854	0,9	Artigas	43977	40,0
			Bella Unión	19274	16,0
Canelones	471954	0,8	Cañada Grande	430000	410,0
Cerro Largo	78762	0,7	Melo	50578	45,0
			Río Branco y Bal. Lago Merín	13783	8,0
Colonia	111732	1,2	Polanco	26096	37,0
			Reducto	27784	50,0
			La Paz	37509	41,0
Durazno	52137	0,6	Durazno	35570	23,0
			Sarandí del Yí	7289	4,5
Flores	22982	0,9	Trinidad	22394	20,0
Florida	57947	0,8	Florida	44344	40,0
Lavalleja	52745	0,8	Minas	41000	32,3
Maldonado	159141	1,1	Las Rosas	130918	150-330
			Cerro Pelado	82400	150,0
			La Alameda	24800	25,0
Paysandú	108760	0,8	Paysandú	75000	60,0
			Guichón	5200	4,0
			Quebracho	4500	3,8
Río Negro	49553	0,8	Fray Bentos	23024	18,4
			Young	15660	12,5
Rivera	95891	0,9	Rivera	76795	66,7
			Tranqueras	7545	4,0
Rocha	63942	0,7	Rocha	25795	17,0
			Castillos	8486	6,5
			Lascano	6994	5,8
Salto	117029	0,8	Salto	99072	80,0
San José	91838	1	San José de Mayo	50000	50,0
			Ciudad del Plata	31180	40,0
Soriano	75983	0,7	Mercedes	43986	30,0
			Dolores	21098	15,0
Tacuarembó	80393	0,7	Tacuarembó	51669	40,0
			Paso de los Toros	13328	8,0
Treinta y Tres	44962	0,5	Treinta y Tres	32956	16,5

Tabla 10.- Tasa de generación y SDF por departamento

Distribución de la población en el interior del país[8]:

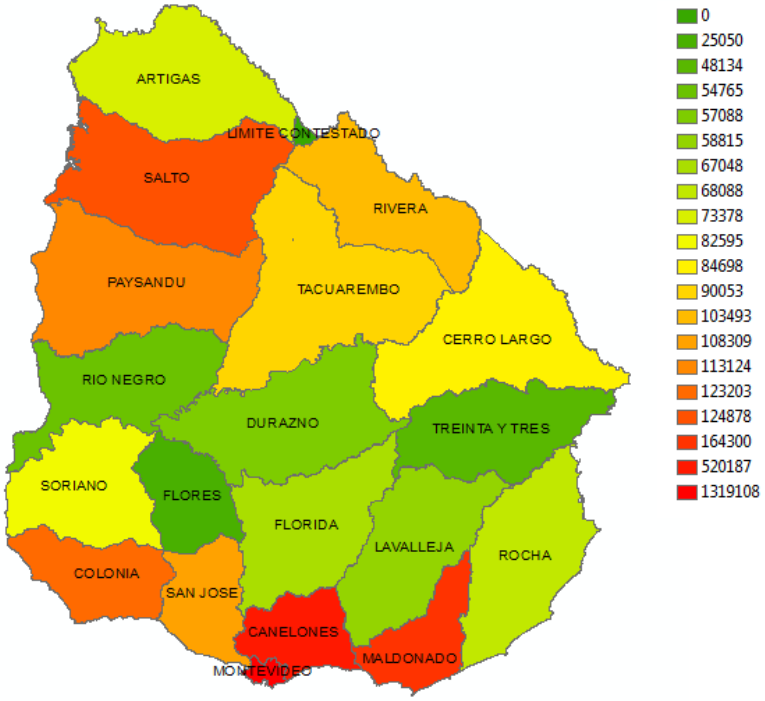


Gráfico 10.- Distribución de la población

3.3 Montevideo

El Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana (PDRS) surge en el 2005 con el objetivo de logar una adecuada gestión de los residuos generados en esta zona. La formulación del PDRS nace en función de la necesidad de solucionar los problemas ambientales y el impacto negativo de los RSU en los cuerpos de agua y en los sistemas de saneamiento.

El Plan Director se presenta en varios documentos según el tipo de residuos, debido a que la gestión de cada uno es distinta e independiente. En la figura 3 se puede observar la estructura del Plan.

[8] Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE) – Censo 2011



Figura 3.- Estructura del PDRS

El PDRS considera todos los residuos sólidos que se generan en el Área Metropolitana de Montevideo (AMM), incluyendo:

- Residuos Sólidos Urbanos (RSU): provenientes de actividades urbanas en general
- Residuos Sólidos Industriales (RSI): provenientes de las industrias, agroindustrias y servicios. Se clasifican en alta y mediana peligrosidad (RSI Cat I+II); baja peligrosidad (RSI Cat III)
- Residuos Sólidos Hospitalarios (RSH): generados en los centros de salud, comunes y contaminados que pueden constituir un riesgo a la salud o al ambiente.
- Residuos Sólidos Especiales (RSE): incluyen baterías de plomo-ácido agotadas; vehículos fuera de uso; neumáticos fuera de uso; aceites usados y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

En el gráfico 11 se muestra la distribución porcentual de los residuos mencionados, en el horizonte del PDRS.

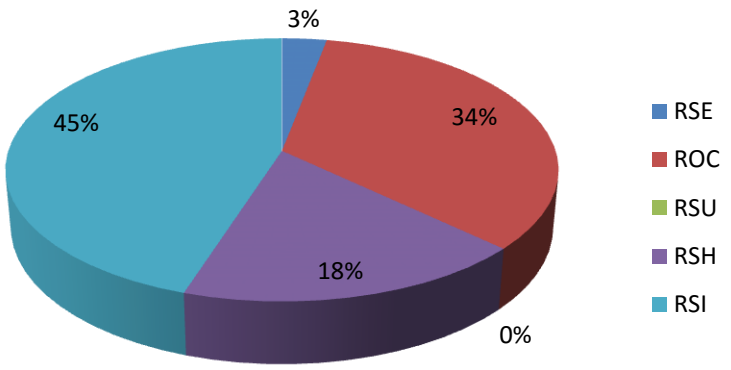


Gráfico 11.- Distribución porcentual de residuos

Durante el 2003 se realizaron estudios para determinar las tasas de generación de los distintos tipos de residuos que incluye el PDRS para la zona Metropolitana y algunos departamentos. En particular en la Tabla 11 se pueden apreciar algunos valores para los RSU, RSD y RSDPG[9].

Departamento	Población Urbana	Tasa de generación (kg/hab.día)			Total generado (ton/día)		
		Domicil.	RSDPG*	RSU	Domicil.	RSDPG*	RSU
Montevideo	1.370.266	0,50	0,88	1,22	685	1.210	1.678
Canelones	314.092	0,38-0,50	0,62	0,82	119-157	196	254
San José	31.129	0,38-0,50	0,62	0,77	12-16	19	24
AMM	1.715.487	0,38-0,50	0,83	1,14	652-858	1.425	1.956
* RSDPG: Residuos sólidos domiciliarios y de pequeños generadores							

Tabla 11.- Resumen de la generación de residuos

A su vez en el Plan Director se estima la cantidad generada de RSU que se espera para el 2025, como se detalla en la tabla 12.

[9] RSDPG: Residuos Sólidos Domiciliarios y de Pequeños Generadores.

Año	Montevideo	Canelones	San José	Total AMM
2003	1.678	258	24	1.960
2005	1.700	260	25	1.984
2010	1.780	324	31	2.135
2015	1.868	354	33	2.254
2020	1.962	391	35	2.387
2025	2.082	433	37	2.552

Tabla 12.- Proyección de la generación de los RSU (ton/día)

Dentro de las principales propuestas del PDRS se destacan la Construcción del Parque Ambiental Cañada Grande ubicado en el Departamento de Canelones para el cual se prevé un Relleno Sanitario, un Relleno de Seguridad y una Planta de tratamiento térmico de residuos peligrosos.

Debido a las distancias desde los centros de generación hasta el Parque Ambiental Cañada Grande, también se propone la instalación de Estaciones de transferencia en puntos estratégicos.

Este proyecto no pudo llevarse a cabo ya que causó una gran disconformidad por parte de los vecinos de la zona, que desde el comienzo se manifestaron en contra del mismo.

3.3.1 Sector Informal

Con el Plan Director se buscaba también disminuir las actividades informales, por lo que se proponía la introducción de la separación de los residuos en el origen, la recolección selectiva y la construcción de Centros de Reciclaje. En dichos centros se calcificarían los materiales obtenidos de la recolección selectiva previa.

Se proponía comenzar con seis zonas piloto y luego continuar con la ampliación progresiva al 2010, construyendo 19 centros de reciclaje, de ellos tres en Canelones y los de más en Montevideo.

La recolección selectiva y la operación de los Centros de Reciclaje serían tareas realizadas por ex-clasificadores informales, creando de esta forma más de 1,400 puestos de trabajo.

Paralelamente, el esquema anterior sería complementado con tres Plantas Abiertas de Clasificación, las cuales servirían a los clasificadores aun informales, para que en lugar de clasificar los residuos en sus hogares, trabajen en estas plantas, contribuyendo a mitigar los problemas sanitarios y ambientales en los asentamientos.

Adicionalmente a las medidas mencionadas, se recomendaba el realojo de los asentamientos de viviendas irregulares localizados sobre las márgenes de los cursos de agua, complementándolo con una limpieza sistemática de sus cauces y márgenes. A su vez, deben establecerse cordones y fajas de protección, determinando áreas de no edificación en forma de parques lineales.

3.3.2 Actualidad 2015 en Montevideo

En Montevideo existen experiencias de clasificación y recuperación de materiales desde la década de los ‘90, que involucran a los clasificadores de residuos, Organizaciones de la Sociedad Civil y a la Intendencia de Montevideo.

El plan de gestión de la ciudad de Montevideo para la recuperación de envases no retornables, incluye los generados en los domicilios y los de pequeños generadores cuyas características y volumen de generación sean similares a los domiciliarios. La estrategia propuesta, se basa en la clasificación en origen, recolección selectiva, clasificación y acondicionamiento, acopio y comercialización.

Para la clasificación en origen se proponen dos fracciones: seco y húmedo.

Residuos secos: Productos y materiales de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y tetrapak.

Residuos húmedos: Restos de alimentos, papeles sucios, pañales y otros residuos higiénicos.

La fracción seca es recolectada y enviada a plantas de clasificación para la recuperación de los materiales valorizables con el fin de comercializarlos. Por otro lado la fracción húmeda y los descartes de las plantas de clasificación, son enviados a disposición final.

El plan también considera la formalización del trabajo de los clasificadores y promueve la conformación de empresas. Además se considera que los integrantes del sector informal de recuperación de materiales reciclables son los primeros beneficiados con las oportunidades laborales que se generen y que su participación es clave para alcanzar los objetivos buscados.



Figura 4.- Contenedores en la vía pública

El programa “Tu envase sirve” surge como respuesta a la implementación del Plan de Gestión de Envases, que busca la recuperación y reciclaje según lo establecido en la Ley de Envases y su Decreto reglamentario.

Involucra la participación del sector privado a través de la Cámara de Industrias del Uruguay (CIU) y al estado a través del MVOTMA, Ministerio de Desarrollo Social (MIDES) y las Intendencias Departamentales. Hoy en día el programa es aplicado en los departamentos de Montevideo, Canelones, Flores, Maldonado, Rivera y Rocha.

Este plan tiene una mirada ambiental desde el punto de vista de la aplicación del principio de responsabilidad extendida al productor, que lo obliga a contar con las medidas necesarias para prevenir la afectación al ambiente, posibilitando la recuperación y reciclaje de los diversos materiales. Además, contempla la inclusión social de clasificadores contribuyendo a la creación y dignificación de los puestos de trabajo vinculados a la clasificación de residuos.

La entrega de los residuos es voluntaria y se realiza en grandes superficies como ser supermercados, centros comerciales y otros puntos de venta al consumo en todos los Municipios.



Figura 5.- Contenedores de “Tu envase sirve”, Montevideo

Plantas de clasificación

Hoy en día, se encuentran operativas cuatro plantas de clasificación de residuos domiciliarios en la ciudad de Montevideo

- Planta La Paloma, inaugurada en Marzo 2014
- Planta Géminis, inaugurada en Abril 2014
- Planta Burgues, inaugurada en Setiembre 2014
- Planta Durán, inaugurada en Octubre 2014

Ubicación:

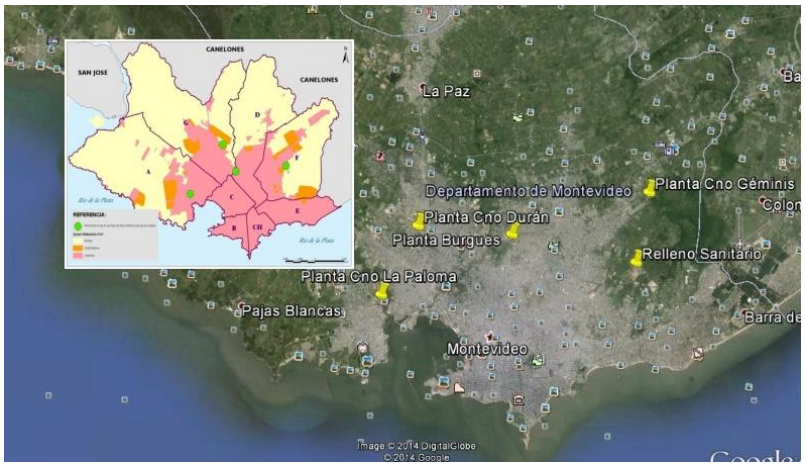


Figura 6.- Ubicación Plantas de Clasificación

Se realizaron visitas las plantas de clasificación La Paloma y Géminis, la planta de tratamiento de residuos orgánicos (TRESOR) y el sitio de disposición final de Montevideo Felipe Cardozo, el 26 de Septiembre del 2015, guiadas por la Dra. Lourdes Gadea Abogada asesora del Departamento de Desarrollo Ambiental (IM).

Dichas visitas nos permitieron conocer las diferentes etapas que componen a la gestión de residuos que se realiza actualmente en Montevideo.

En particular en las plantas de clasificación, se observó cómo es la operación del flujo de residuos desde el ingreso de los materiales, su acondicionamiento y la salida para su posterior comercialización. También nos permitió conocer el beneficio social generado, a través de la experiencia de los clasificadores que hoy en día se encuentran trabajando formalmente y que destacan positivamente el gran cambio en las condiciones de trabajo.

A continuación se presentan algunas de las fotos tomadas durante visitas a Plantas de Clasificación:



Figura 7.- Plantas de Clasificación

Planta de Tratamiento de Residuos Orgánicos (TRESOR)

La Intendencia de Montevideo cuenta con un una planta de tratamiento de residuos orgánicos ubicada en Camino Toledo Chico, al lado del Vivero Municipal, a la cual también se realizó una visita el 26 de Septiembre del 2015, a cargo de la Ing. Quim. Isabel Alonso.

Esta planta trata los residuos orgánicos a través de la tecnología de compostaje, transformándolos en abono orgánico que luego es reinsertado en las cadenas productivas. De esta manera se logra una mejora significativa en el desempeño ambiental del área metropolitana, disminuyendo la cantidad de residuos que se envían a disposición final.

Actualmente la planta se dedica principalmente al tratamiento de residuos agroindustriales. Los mismos son aceptados de acuerdo a un protocolo de admisión que tiene en cuenta sus características físico-químicas.

Según datos del 2014, en Tresor son tratados 3531 m^3 de residuos provenientes de la Intendencia de Montevideo (IdeM) y 7521 m^3 de residuos orgánicos industriales.

El compost que se obtiene luego de todo el proceso es utilizado por la División Áreas Verdes de la IdeM, para el abono de espacios públicos en general, por Montevideo Rural y llega al público a través de la venta directa. Su composición en nutrientes y materia orgánica lo hacen atractivo para el uso como fertilizante orgánico sustitutivo de otro tipo de enmiendas y de fertilizantes químicos.

La tecnología aplicada de degradación está sujeta a controles y aireaciones periódicas con el fin de favorecer la multiplicación de microorganismos aeróbicos. Los lixiviados provenientes del sistema son recogidos a través de drenajes y canales y enviados hacia lagunas de sedimentación y oxidación. Las aguas tratadas en el sistema de depuración son vertidas a curso de agua y cumplen con los requerimientos del Decreto 253/79.

A continuación se muestran algunas imágenes de la Planta.



Figura 8.- Vista aérea de la Planta



Figura 9.- Pilas de acumulación de residuos orgánicos para generar compost

4 Bibliografía

[1] Compromiso Empresarial para el Reciclaje (CEMPRE) – "Residuos Sólidos Urbanos - Manual de Gestión Integral"– 1998

[2] George Tchobanoglous – "Gestión Integral de Residuos Sólidos" –1992

[3] Ing. Wagner Colmenares Mayanga, Ing. Karin Santos Bonillla – Generación y Manejo de Gases en Sitios de Disposición Final

[4] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) – "Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos" –2007

[5] IPCC/OECD/IEA – Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, *"CH_4 Emissions from Solid Wast Disposal".*

[6] Aguiar-Virgen – "Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogas" –2011

[7] U.S. EPA – "Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User´s Guide" –2005

[8] U.S. EPA – "Manual de Usuario Modelo Centroamericano de Biogás" –2007

[9] Pablo Zamonsky, Sebastián Bajsa – Captura y Quema de Biogás en Rellenos Sanitarios y su utilización para la Generación de Energía Eléctrica. La experiencia del Relleno Sanitario de Las Rosas

[10] Encuestadora ABRELP – "Panorama dos residuos sólidos no Brasil" –2014

[11] FICHTNER-LKSur "Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana" – 2005

[12] María José González – "Proceso técnico y político para la definición de una estrategia para instrumentar una solución consensuada a la disposición final de residuos sólidos urbanos en Uruguay" – 2012

[13] LKSur – "Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos", Informe 2: Canelones, San José, Melo, Tacuarembó, Salto y Paysandú –, 2013

[14] Horacio Terraza, Hans Willumsen – Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization – 2009

[15] U.S. EPA – "Catalog of CHP Technologies" – 2015

[16] CSI Ingenieros, Estudio Pittamiglio – "Información de base para el diseño de un plan estratégico de residuos sólidos" – 2011

[17] Jorge A. Bolaños, Cacho Ruíz – "Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos" – 2001

[18] Ing. Pablo Zamonsky, Ing. Sebastián Bajsa, Ing. Federico Steffenino – Comunicación personal – 2015

Páginas web visitadas:

- http://fld.com.br/catadores/pdf/politica_residuos_solidos.pdf
- http://www.redrrss.pe/material/20090128200240.pdf
- http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1439/tesis.pdf?sequence=1
- http://campus.usal.edu.ar/pluginfile.php/33674/mod_book/chapter/8020/riesgos-tecnologias-residuos-urbanos.pdf
- http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/graphics/2015/basura/MTB-Una%20Falsa%20Solucion.pdf
- http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen15/modelo.pdf
- https://observatoriopnrs.files.wordpress.com/2015/07/panoramaabrelpe.pdf
- http://www.brasil.gov.br/
- http://www.sinia.cl/1292/articles-49564_informe_final.pdf
- https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v1.pdf

Memoria Descriptiva

Regionalización de Rellenos Sanitarios en el Interior del país, con generación de energía eléctrica



Verónica Garicoits

Luciana Pan

Tutores:

Dra. Ing. Elizabeth González

MSc. Nicolás Rezzano

Dr. Ing. José Cataldo

Proyecto de Fin de Carrera

Julio 2016

Índice

1 Introducción 6
2 Descripción del Relleno Sanitario Regional 7
2.1 Ubicación y acceso al relleno sanitario 8
2.2 Parámetros de diseño 10
3 Explotación del RSa 13
3.1 Conformación de los módulos 13
3.1.1 Celda diaria 13
3.1.2 Material de cobertura 15
3.2 Fondo del relleno 16
3.2.1 Impermeabilización del fondo 16
4 Sistema de recolección de lixiviado 17
4.1.1 Capa drenante 17
4.1.2 Conducciones principales 18
4.1.3 Tuberías secundarias 18
4.1.4 Conducciones fuera de los módulos 19
4.1.5 Cámaras 19
5 Tratamiento de lixiviados 21
5.1 Sistema de tratamiento 21
5.1.1 Ingreso a la planta de tratamiento 21
5.1.2 Conducciones entre las lagunas 24
5.1.3 Laguna de ecualización 24
5.1.4 Lagunas de tratamiento 25
5.1.5 Humedal de flujo vertical 26
5.2 Características constructivas 26
5.3 Funcionamiento del sistema 28
5.3.1 Tiempo seco 28
5.3.2 Tiempo de lluvia 28
5.4 Descarga de la planta de tratamiento 30
5.4.1 Emisario 30
5.4.2 Disposición final 31

6 Captación del biogás y generación de energía 32
6.1 Drenes de captación 32
6.2 Sistema de bombeo 33
6.3 Conducciones de biogás 33
6.4 Antorcha 34
6.5 Motores de combustión interna 34
7 Drenaje de pluviales 35
7.1 Cunetas 35
7.2 Alcantarillas 36
8 Caminería interna 37
9 Instalaciones complementarias y de control 38
9.1 Caseta de control de ingreso y vigilancia 38
9.2 Balanza 38
9.3 Oficinas y vestuarios 38
9.4 Estacionamiento 39
9.5 Cerco perimetral 39
9.6 Cortina arbórea 39
9.7 Reservorio de agua 39
9.8 Suministro de energía eléctrica 39
10 Mano de obra 40
11 Clausura del RSa 41
12 Bibliografía 43

Índice de Figuras

Figura 1.- Esquema general del relleno sanitario regional 7
Figura 2.- Ubicación y acceso al predio 8
Figura 3.- Imagen satelital del predio seleccionado 9
Figura 4.- Conformación de la celda diaria 14
Figura 5.- Detalle de los drenes de captación de lixiviado 18
Figura 6.- Esquema del sistema de tratamiento 21
Figura 7.- Corte longitudinal de la cámara de rebose con detalle del orificio de salida 23
Figura 8.- Corte en planta de la cámara de rebose y detalle transversal del orificio de salida 23
Figura 9.- Salida laguna anaerobia y entrada a primer laguna facultativa 27
Figura 10.- Salida primer laguna facultativa y entrada a segunda laguna facultativa 27
Figura 11.- Esquema del tratamiento del lixiviado en tiempo seco 28
Figura 12.- Esquema del tratamiento del lixiviado en tiempo de lluvia 29
Figura 13.- Esquema del tratamiento del lixiviado durante un evento de gran magnitud 29
Figura 14.- Detalle del dren de captación de biogás 32
Figura 15.- Cuneta tipo a construir 35
Figura 16.- Detalle de un módulo clausurado 41
Figura 17.- Esquema del Módulo 1 clausurado 42

Índice de Tablas

Tabla 1.- Parámetros de diseño para el relleno regional 12
Tabla 2.- Características de los módulos 13
Tabla 3.- Características de la celda diaria 15
Tabla 4.- Características de las conducciones principales 18
Tabla 5.- Características de las tuberías secundarias 19
Tabla 6.- Características tuberías por fuera de los módulos 19
Tabla 7.- Características cámaras 20
Tabla 8.- Características y dimensiones de la cámara de rebose 22
Tabla 9.- Características conducciones entre lagunas 24
Tabla 10.- Dimensiones de la laguna de ecualización 24
Tabla 11.- Características de las bombas 25

Tabla 12.- Parámetros de diseño para Laguna Anaerobia 25
Tabla 13.- Parámetros de diseño para la primer Laguna Facultativa 25
Tabla 14.- Parámetros de diseño para la segunda Laguna Facultativa 25
Tabla 15.- Dimensiones de las lagunas 26
Tabla 16.- Parámetros de diseño para el humedal FSSV 26
Tabla 17.- Dimensiones del humedal FSSV 26
Tabla 18.- Características de los tramos del emisario 30
Tabla 19.- Características cámaras en el emisario 31
Tabla 20.- Cantidad de drenes de captación de biogás por módulo 33
Tabla 21.- Características de los motores seleccionados 34
Tabla 22.- Geometría de las cunetas para el drenaje pluvial 35
Tabla 23.- Geometría de las cunetas empastadas 35
Tabla 24.- Características alcantarillas 36
Tabla 25.- Características caminería 37
Tabla 26.- Personal de trabajo del relleno sanitario 40

Acrónimos

RS: Residuos Sólidos

RSa: Relleno Sanitario

SDF: Sitio de Disposición Final

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

1 Introducción

Como fue expuesto en la Sección 4.1 de la Memoria Justificativa, se determinaron 9 regiones en todo el país y con el fin de disponer en forma ambientalmente segura los RS generados en una de las regiones definidas, se propone un Relleno Sanitario Regional que comprenda las ciudades de Mercedes y Dolores, ubicadas en el Departamento de Soriano, y a Fray Bentos en el Departamento de Río Negro.

Por un lado, desde el punto de vista ambiental resulta prioritario realizar acciones de apoyo a las Intendencias de Río Negro y Soriano para mejorar la calidad de los vertederos que se operan hoy en día para disponer los residuos sólidos generados en la ciudades de Dolores, Mercedes y Fray Bentos, ya que dicha disposición no se realiza de forma ambientalmente segura. De esta forma se busca preservar y mejorar el medio ambiente y así influir en la calidad de vida de la población orientando al desarrollo socioeconómico sostenible.

Además, del análisis realizado y detallado en la Memoria Justificativa previamente, la generación de energía eléctrica es una opción para los RSa de gran escala, como ocurre con el relleno propuesto. Con lo cual, no sólo se estaría solucionando un problema ambiental de gran significancia, como lo es la disposición final de los residuos, sino que se generaría energía eléctrica proveniente de una fuerte renovable no tradicional. De esta forma se puede contemplar al proyecto en cuestión como una doble solución ambientalmente amigable, si se realiza de forma controlada y adecuada.

Por lo tanto, el presente documento pretende describir los componentes presentes en el Relleno Sanitario Regional propuesto, ubicado en la región Oeste del territorio Uruguayo. También se detalla la determinación de diversas variables y parámetros empleados en el diseño del RSa.

2 Descripción del Relleno Sanitario Regional

El caso de estudio seleccionado para diseñar a nivel de Anteproyecto incluye un Relleno Sanitario Regional para disponer los RSU generados por las ciudades de Dolores, Mercedes y Fray Bentos y una planta de generación de energía a partir de la degradación de los residuos dispuestos en el RSa.

El RSa Regional está conformado, a grandes rasgos, por una zona de acceso, en donde se ubicarán oficinas, vestuarios, la balanza para el pesaje de los camiones, la planta de generación de energía eléctrica, el estacionamiento y la vigilancia; la zona para la disposición de los RS que ingresan al sitio; un sistema de lagunas para tratar los lixiviados generados por los residuos dispuestos y un sistema de conducción de los efluentes previo a su tratamiento y posterior al mismo para ser vertidos al curso de agua limítrofe al predio.

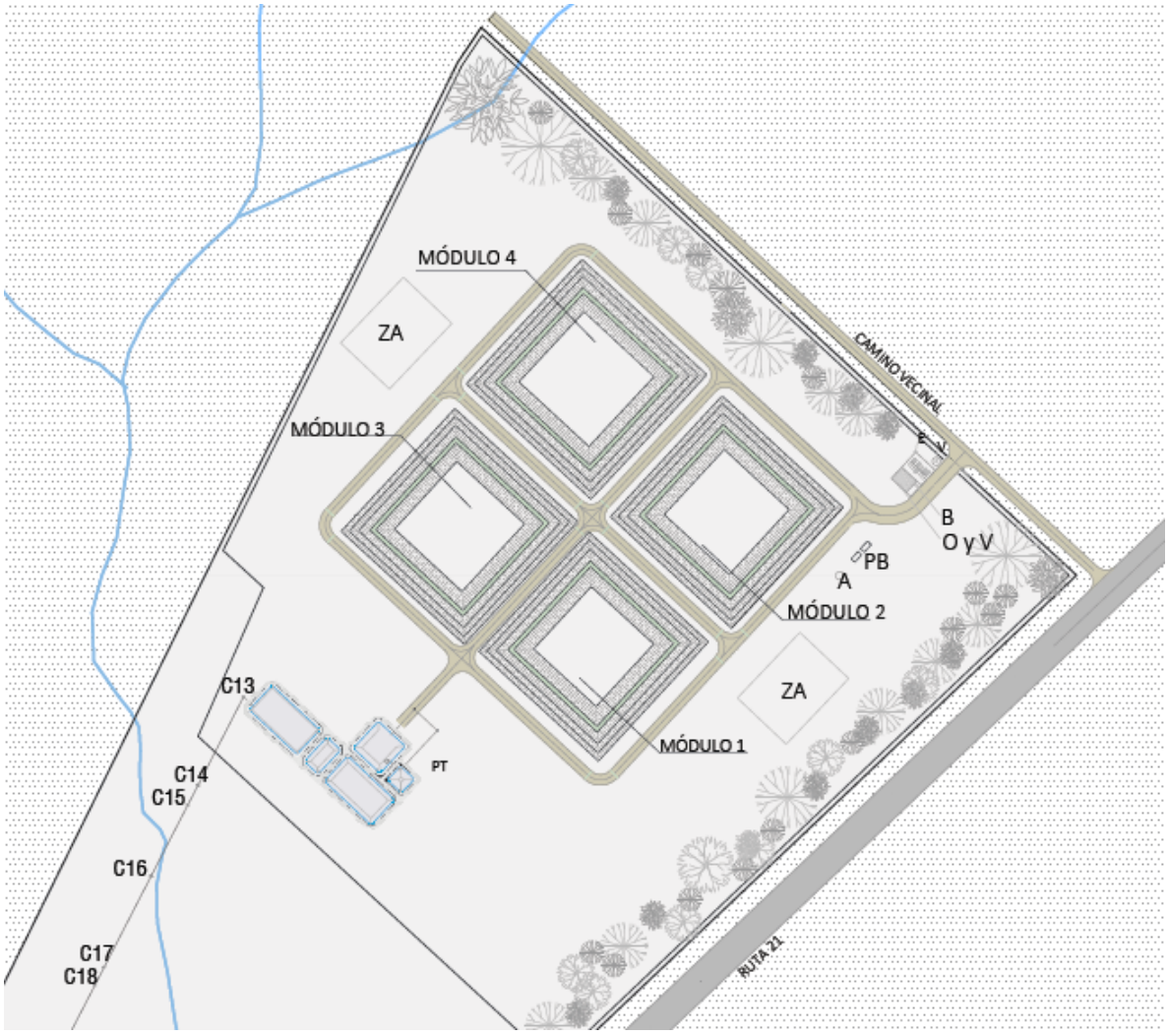


Figura 1.- Esquema general del relleno sanitario regional

Las características del relleno se detallan en las secciones a continuación. Cabe recordar que el mismo funcionará en dos turnos al día, como se explica en la Sección 2 de la Memoria Operativa.

2.1 Ubicación y acceso al relleno sanitario

El relleno se encuentra ubicado en el Padrón 8378 del Departamento de Soriano, a aproximadamente 16 km de la ciudad de Mercedes, 19 km de Dolores y 50 km de Fray Bentos.

Para llegar al predio los camiones que transportan los residuos desde la ciudad de Fray Bentos deberán recorrer 30 km por la Ruta Nacional 2 y al llegar a la ciudad de Mercedes tomar la Ruta Nacional 21 para continuar el recorrido (20 km) hasta el RSa Regional.

El recorrido de los camiones desde la ciudad de Mercedes será directo por la Ruta Nacional 21.

Los camiones desde Dolores transitarán los 19 km por la Ruta Nacional 21.

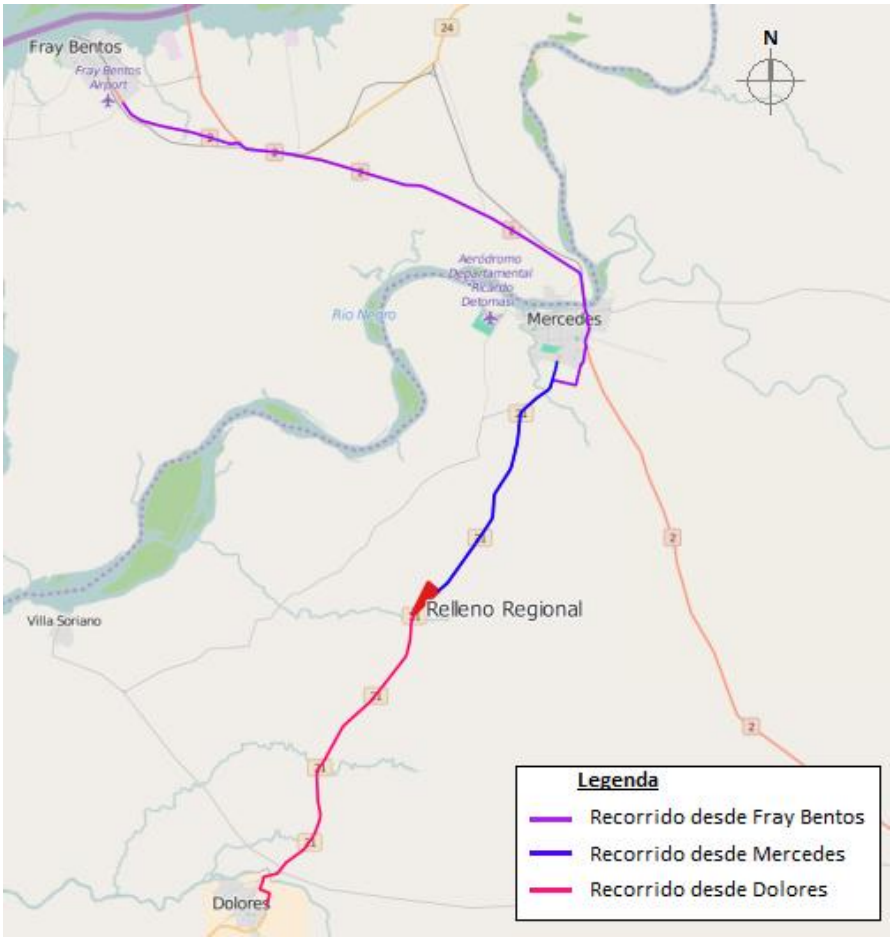


Figura 2.- Ubicación y acceso al predio

La principal ruta de acceso al sitio es a través de la Ruta Nacional 21 y la entrada al RSa se encuentra ubicada sobre el camino vecinal lindero al predio.

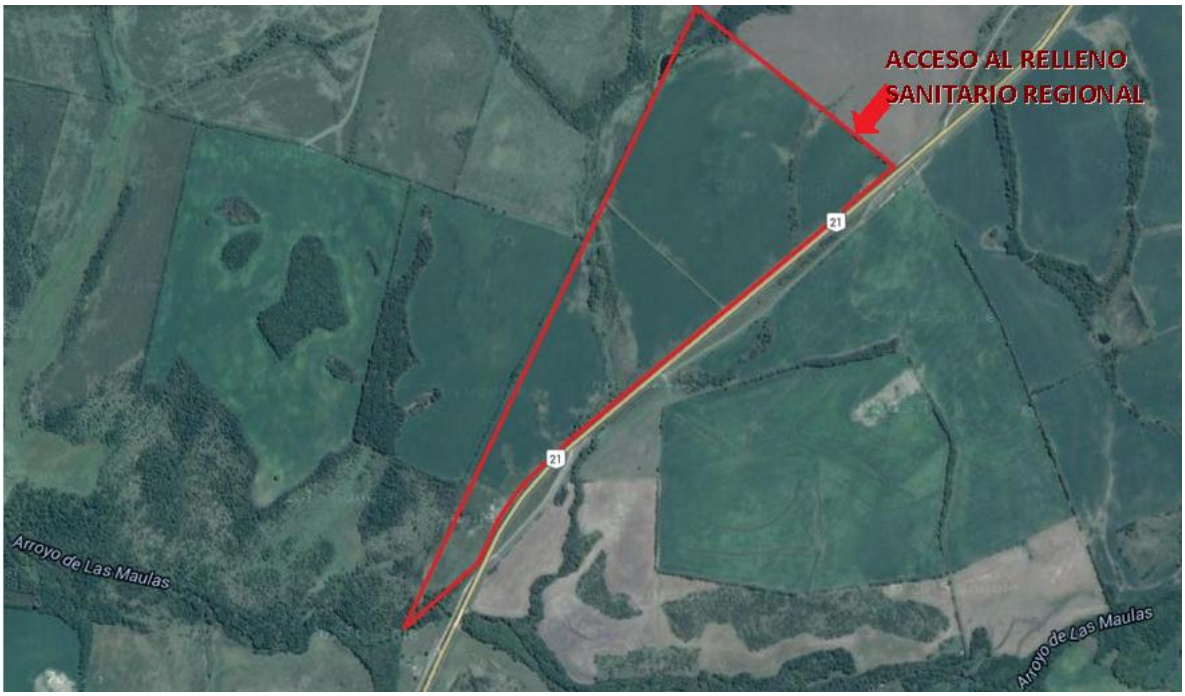


Figura 3.- Imagen satelital del predio seleccionado

2.2 Parámetros de diseño

En la tabla a continuación se presentan algunos de los parámetros y criterios de diseño adoptados para realizar los cálculos y definir las distintas instalaciones del Relleno Regional.

PARAMETRO	COMPONENTE	VALOR ADOPTADO
Proyección de la Población		1,007 hab/año
Tasa de Generación por habitante		0,72 kg/hab.dia
Explotación del RSa Regional	Vida útil	Proyectado para 20 años
	Año de inicio	2016
	Año de clausura	2035
	Construcción por módulos	4 módulos
	Densidad de compactación	700 kg/m^3
Celda diaria	Ancho de frente de trabajo	6 m
	Máxima altura de celda	2,7 m
	Espesor cobertura diaria	20 cm de espesor
Impermeabilización del fondo		Compactación de la sub-base
	Material arcilloso	60 cm de espesor
	Geomembrana	PEAD de 1,5 mm de espesor
Sistema de captación y conducción de lixiviados	Conducciones principales	Tuberías ϕ160 0,5% de pendiente
	Conducciones secundarias	Tuberías perforadas ϕ110 1% de pendiente
	Drenes	Piedra partida de 3,5 - 5 cm por sobre la tubería Filtro de geotextil envolviendo la piedra partida Manto de arena de 30 cm de espesor
	Colectores a planta de tratamiento	Tuberías ϕ250 0,4% de pendiente
Ubicación de las celdas en el predio	Criterios de exclusión	200 metros de Ruta Nacional 21 800 metros del Arroyo Las Maulas 100 metros de los límites de predios linderos Zona alta del predio
Conformación de los módulos	Método de llenado	Módulo excavado de 1,8 metros de profundidad 5 niveles por modulo; 1 nivel por año
	Geometría de la celda	Tronco pirámide
	Taludes internos	1V:3H
	Taludes externos	1V:3H
	Bermas	Ancho 4 metros, a partir de los 8,5 metros de altura
	Cubrición con arcilla	Diaria (20 cm); intermedia (30 cm)

Captación de pluviales exterior a la zona de los RS	Situación más desfavorable	Módulos clausurados
	Sistema de conducción	Cunetas perimetrales empastadas
	Período de recurrencia	5 años
Generación de biogás	Modelo empleado	Modelo general de degradación de primer orden
	N° fases de degradación	2: lenta y rápidamente biodegradable
	Factor de corrección	0,56
Generación de lixiviado	Balance de paso anual	Metodología propuesta por Tchobanoglous; balance hidrológico en la masa de residuos
	Balance de paso mensual	Modificación de la metodología propuesta por Tchobanoglous
	Humedad inicial de los residuos	40%
	Serie de precipitación	Estación Meteorológica "Mercedes" (1983 - 2002)
	Evapotranspiración	Media mensual
Planta de tratamiento	Caudal de diseño	Percentiles 10, 50 y 90 de la serie de caudal de lixiviando en tiempo seco
	Parámetros de diseño	Concentraciones de DBO y Nitrógeno Total correspondientes a cada caudal de diseño (datos Felipe Cardoso y Las Rosas
	Limitantes para el vertido	Decreto 253/79 y modificaciones Remoción de nitrógeno según la Propuesta de Modificación del Decreto 253/79 y modificativos (GESTA AGUA)
	Conformación de la planta	Laguna de ecualización; Laguna anaerobia; 2 Lagunas facultativas; Humedal de Flujo Vertical
Recolección de biogás	Construcción	Luego de clausurado el módulo
	Sistema de recolección	Tuberías perforadas verticales ϕXX
	Drenes	Piedra partida de 5 cm mínimo, alrededor de la tubería Malla envolviendo la piedra partida Piedra partida en el interior de la tubería
	Radio de influencia	
	Distribución	En vértices de triángulosequiláteros (tresbolillo)
	Ubicación	Sobre la superficie de coronamiento del módulo y en la berma
Planta de generación de energía eléctrica	1era Etapa	10 años de duración Motor de combustión interna; 130 kW de potencia
	2da Etapa	11 años de duración Motor de combustión interna; 150 kW de potencia
Caminería	Acceso del SDF	17 metros de ancho
	Caminería principal (permanente)	10 metros de ancho
	Caminería secundaria (temporal)	7 metros de ancho

	Conformación	Tosca compactada de 30 cm de espesor
Clausura de los módulos	Material de cobertura	Arcilla, 60 cm de espesor
	Capa drenante para conducir las pluviales fuera del modulo	Geodren de PEAD, 8 mm de espesor Geotextil
	Cubierta final	Cobertura vegetal, 40 cm de espesor

Tabla 1.- Parámetros de diseño para el relleno regional

3 Explotación del RSa

La configuración adoptada para el Relleno Sanitario busca optimizar el aprovechamiento del área disponible del predio seleccionado.

La disposición de los residuos se realizara en cuatro módulos de cinco años de funcionamiento cada uno, correlativos en el tiempo.

3.1 Conformación de los módulos

Para el diseño de los módulos se emplearon los valores de residuos dispuestos anualmente que se presentan en la Sección 5.4 de la Memoria Justificativa, asumiendo un incremento del 30% anual en el volumen de los residuos a disponer, debido al material de cobertura.

En la Tabla 2se presentan algunas características de cada módulo, en particular la altura total de cada módulo incluye el espesor de la cobertura diaria e intermedia.

Módulo	Año de inicio	Año de finalización	Altura total (m)	Volumen RSU compactados (m^3)	Volumen total: RSU compactados + material cubrición (m^3)
1	2016	2020	13,0	163.899	213.068
2	2021	2025	12,9	169.295	220.084
3	2026	2030	12,7	174.869	227.330
4	2031	2035	12,6	180.627	234.815

Tabla 2.- Característicasde los módulos

Cada módulo cuenta con cinco niveles conformados por los residuos a disponer en un año. El primer nivel de cada módulo se construye por debajo del nivel del terreno, es decir excavado, mientras que los restantes cuatro, por sobre el nivel del terreno.

Las pendientes de los taludes consideradas tanto para el nivel excavado como para los niveles por sobre el terreno fueron de 1V:3H.

En períodos de lluvia es importante tener en cuenta que los residuos depositados deben ser cubiertos con un film de PEBD, de forma de que el agua no se contamine por estar en contacto con los residuos y pueda ser conducida libremente hacia la descarga. También se logra disminuir la complejidad en la operación tanto para los operarios como para los equipos.

3.1.1 Celda diaria

La celda diaria es conformada con los residuos que ingresan al SDF en un día de trabajo más el material de cubrición diaria.

Las características que definen la geometría de la celda son el volumen de residuos compactados, su altura, ancho y pendiente de los taludes.

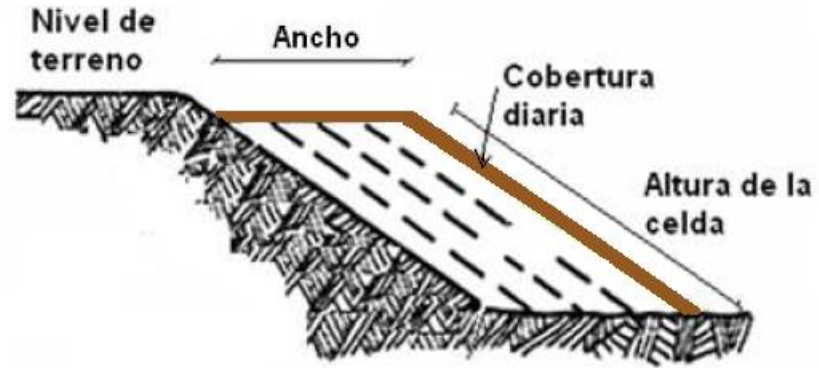


Figura 4.- Conformación de la celda diaria

En la

Módulo	Año	Volumen diario de RSU (m^3/día)	Altura celda (m)
1	2016	62,1	1,8
	2017	62,5	1,8
	2018	62,9	2,1
	2019	63,3	2,7
	2020	63,7	2,3
			2,3
2	2021	64,1	1,8
	2022	64,5	1,8
	2023	64,9	2,1
	2024	65,4	2,7
	2025	65,8	2,2
			2,2
3	2026	66,2	1,8
	2027	66,6	1,8
	2028	67,1	2,1
	2029	67,5	2,6
	2030	67,9	2,2
			2,2
4	2031	68,4	1,8
	2032	68,8	1,8
	2033	69,3	2,1
	2034	69,7	2,6
	2035	70,2	2,1
			2,1

Tabla 3 se presentan los valores adoptados para la conformación de las celdas diarias.

Ancho celda (m)	6		
Talud (1V:xH)	3		
Módulo	**Año**	**Volumen diario de RSU (m^3/día)**	**Altura celda (m)**
1	2016	62,1	1,8
	2017	62,5	1,8
	2018	62,9	2,1
	2019	63,3	2,7
	2020	63,7	2,3
			2,3
2	2021	64,1	1,8
	2022	64,5	1,8
	2023	64,9	2,1
	2024	65,4	2,7
	2025	65,8	2,2
			2,2
3	2026	66,2	1,8
	2027	66,6	1,8
	2028	67,1	2,1
	2029	67,5	2,6
	2030	67,9	2,2
			2,2
4	2031	68,4	1,8
	2032	68,8	1,8
	2033	69,3	2,1
	2034	69,7	2,6
	2035	70,2	2,1
			2,1

Tabla 3.- Características de la celda diaria

El avance diario varía en función de la cantidad de residuos a disponer por día. La cantidad de residuos determinados que ingresan al RSa depende directamente de la población servida, para la cual se utilizó una tasa de crecimiento anual, con lo cual se conoce el ingreso anual de residuos.

3.1.2 Material de cobertura

Se distinguen tres tipos de coberturas a realizar por sobre los residuos depositados en el relleno.

En primer lugar la **cobertura diaria,** la cual es colocada sobre todas las caras expuestas de la celda diaria. La misma cumple el propósito de controlar y evitar la voladura de los materiales residuales dispuestos, prevenir la generación de vectores sanitarios, como ser moscas y ratas, y controlar el ingreso de agua a la masa de residuos durante la operación del relleno. El espesor de la cobertura diaria propuesto es de 20 cm de arcilla compactada, obtenida de la excavación previa del módulo.

Por otro lado, la **cobertura intermedia** es aquella que se coloca una vez al mes por sobre la cobertura diaria, cuyo objetivo es re asegurar los propósitos mencionados para la cobertura diaria y brindar una capa de soporte mayor para los camiones que deban transitar por sobre los residuos ya dispuestos. La misma cuenta con un espesor de 30 cm de arcilla compactada.

Por último, la **cobertura final** es aquella que se coloca por sobre toda la superficie del módulo luego de haber concluido todas las etapas, es decir cuando se procede a clausurarlo. El principal objetivo es limitar la salida de gases del relleno y el ingreso de agua hacia la masa de residuos, evitar la proliferación de vectores y proporcionar una superficie apta para la re vegetación del lugar. El espesor considerado es de 60 cm de arcilla compactada.

Se realizó un balance de movimiento de tierra de forma de verificar la disponibilidad de material para las distintas coberturas a partir del material excavado de cada módulo. Dicho balance se detalla en la Memoria de Operación, Sección 6.1.2.

3.2 Fondo del relleno

La base de las celdas está conformada por dos unidades con funciones específicas: la barrera impermeable y el sistema drenante. Con el primero se busca aislar la masa de residuos de los estratos más profundos evitando la contaminación del subsuelo y el agua subterránea. Mientras que el segundo se encarga de captar y conducir el lixiviado producido hasta la planta de tratamiento y se describe en la Sección4.1.1.

3.2.1 Impermeabilización del fondo

La sub-base del módulo deberá estar limpia de material orgánico (capa vegetal) y piedras, y compactada adecuadamente. Por sobre esta se colocara la barrera impermeable.

El sistema de impermeabilización consiste en una capa de arcilla compactada de 60 cm de espesor, por sobre la cual se colocará una geomembrana de PEAD de 1,5 milímetros de espesor.

La arcilla se colocará en capas de 30 cm de espesor de modo de garantizar la compactación necesaria y evitar la posibilidad de fugas ocasionadas por la coincidencia de gruesos. Durante el proceso constructivo la arcilla que quede expuesta a la acción directa del sol se deberá proteger y mantener la humedad por medio de riego, de manera de prevenir su fisuración y pérdida de impermeabilidad del paquete.

Se deberá colocar la membrana inmediatamente después de la colocación de la arcilla, evitando que la misma se encuentre expuesta a los agentes climáticos. Se debe instalar cuidando de que no existan elementos o irregularidades que puedan afectar su integridad y buscando alcanzar un buen contacto entre la membrana y la arcilla, asegurando la estanqueidad de toda el área.

Dicho paquete de impermeabilización se continuará por debajo de la caminería a construir entre los módulos, previendo el aprovechamiento futuro de dichas zonas para la eventual disposición de

los residuos, en caso de que luego de los 20 años de funcionamiento previstos se continúe explotando el relleno.

4 Sistema de recolección de lixiviado

La captación y conducción de lixiviados es imprescindible ya que permite asegurar su manejo y conducción en forma controlada hacia el sistema de tratamiento.

El sistema de tuberías propuesto para cada módulo está diseñado a modo de “espina de pescado”. Está conformado por 2 tuberías principales y cada una de ellas recibe el aporte de 7 tuberías secundarias distribuidas a lo largo de la conducción principal.

4.1.1 Capa drenante

El sistema de recolección de lixiviado está conformado por un manto drenante de arena de 30 cm de espesor, que se extiende uniformemente en toda la base del relleno, drenes de piedra partida, geotextil y tuberías perforadas.

4.1.1.1 Drenes

Para la construcción de los drenes se coloca por sobre la geomembrana impermeable de 1,5 mm de espesor el geotextil, dejando un sobrante para luego envolver todo el paquete. A continuación se dispone una capa de arena que actúa como sostén de la tubería encargada de la conducción del lixiviado y rodeando a dicha tubería se coloca piedra partida o grava de 3,5 a 5 cm de tamaño. Por último, se toma el geotextil colocado por sobre la geomembrana y se envuelve todo el paquete solapando como mínimo 60 cm de geotextil, el cual cumple la función de filtro y evita la colmatación del dren.

Se distingue entre las conducciones principales, las cuales serán tuberías de 160 mm de diámetro y las tuberías secundarias, de 110 mm de diámetro y perforadas.

4.1.1.2 Manto de arena

Por sobre los drenes se coloca un manto de arena de 30 cm de espesor distribuido uniformemente sobre toda la base del módulo. El objetivo principal del mismo es proteger la geomembrana y generar un medio permeable para el drenaje de los lixiviados hasta los drenes.

4.1.1.3 Geotextil

El geotextil es colocado por sobre la geomembrana de los taludes internos al dren y envuelve a todo el dren como se explicó en la Sección Drenes4.1.1.1. El mismo cumple la función de filtro y protección entre el manto de arena de la base y la piedra partida. En la Figura 5 se presenta un detalle de los drenes de captación de lixiviado.

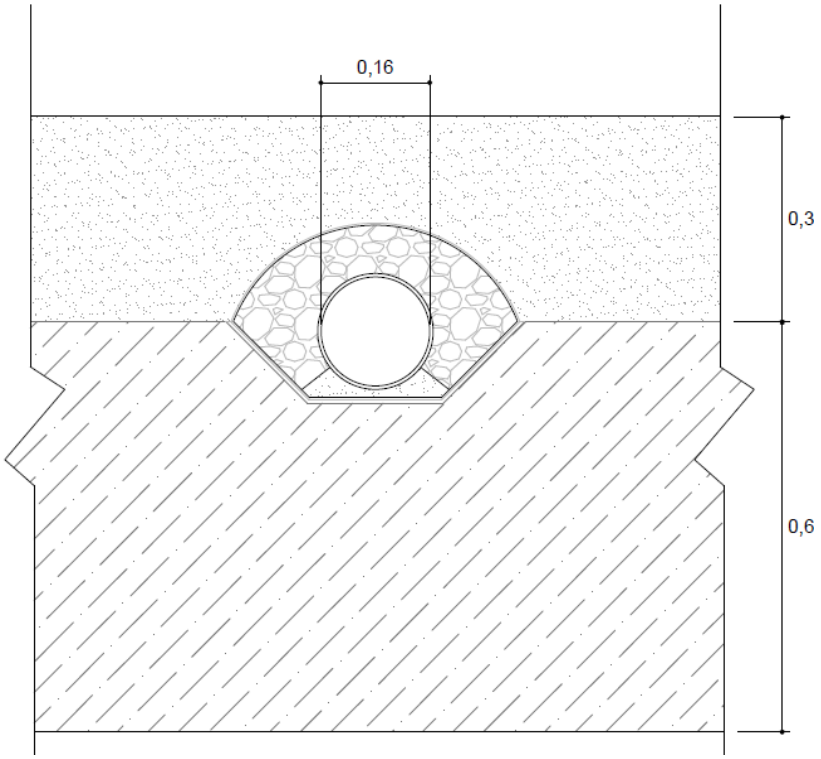


Figura 5.- Detalle de los drenes de captación de lixiviado

4.1.2 Conducciones principales

Cada módulo cuenta con dos conducciones principales de 160 mm de diámetro y 0,5% de pendiente.

Las tuberías principales son las encargadas de conducir el lixiviado captado por los drenes hacia los colectores externos al módulo.

En la Tabla 4 se presentan las características de las tuberías principales.

Módulo	Largo (m)	Separación (m)
1	110.8	73.7
2	112.6	75.0
3	114.6	76.2
4	116.3	77.5

Tabla 4.- Características de las conducciones principales

4.1.3 Tuberías secundarias

Cada módulo cuenta con 14 tuberías secundarias de 110 mm de diámetro, perforadas y 1,0% de pendiente, repartidas homogéneamente entre las dos tuberías principales existentes. La unión entre las secundarias y las principales forma un ángulo de 45° y se materializará con piezas “Y” 160-110.

El largo de dichas tuberías es de 36 o 39 metros dependiendo del módulo debido a que las piezas a utilizar son de 3 metros de largo.

Las tuberías secundarias están uniformemente perforadas, con tres orificios 60° separados entre sí, garantizando la integridad estructural de las mismas, dejando en la parte inferior un ángulo de 120° libre de perforaciones.

En la Tabla 5se presentan los largos de ambas tuberías para cada módulo.

Módulo	Largo (m)	Separación (m)
1	36	18.5
2	39	18.8
3	39.0	19.1
4	39	19.4

Tabla 5.- Características de las tuberías secundarias

4.1.4 Conducciones fuera de los módulos

El caudal de lixiviado recolectado dentro de los módulos derivado a tuberías de 250 mm de diámetro y 0,4 % de pendiente, que conducen el mismo hasta la planta de tratamiento por gravedad. En particular, la tubería hasta la cámara previa a la laguna anaerobia (tramo T13) es de 110 mm de diámetro y 0,5 % de pendiente.

En la Tabla 6se presentan las características de dichas tuberías.

Tramo	Desde	Hasta	Largo	Profundidad Aguas Arriba	Profundidad aguas abajo
T1	C1	C2	77,5	2,50	2,81
T2	C2	C1	57,2	2,86	3,09
T3	C3	C4	75,0	2,49	2,79
T4	C4	C5	55,4	2,84	3,06
T5	C5	C6	93,9	3,14	3,51
T6	C6	C11	93,9	3,56	3,94
T7	C7	C8	76,2	2,50	2,80
T8	C8	C11	51,0	2,85	3,06
T9	C9	C10	73,7	2,48	2,77
T10	C10	C11	49,8	2,82	3,02
T11	C11	C.R	64,6	3,99	2,21
T12	C.R	C12	29,6	2,62	2,74
T13	C12	C.P Anaerobia	49,3	2,82	0,47

Tabla 6.- Características tuberías por fuera de los módulos

4.1.5 Cámaras

Se prevén cámaras en todas las uniones entre los colectores exteriores a los módulos y entre las conducciones principales y dichos colectores, y en los quiebres de las tuberías

Las cámaras a construir son cilíndricas de 1 y 1,2 metros de diámetro. Todas las cámaras tendrán un desnivel entre el zampeado a la entrada y el zampeado a la salida de 5 cm, para asegurar que no ocurra remanso dentro de la misma y hacia la tubería aguas arriba.

En la Tabla 7se presentan las características de las cámaras.

Cámara	Cota zampeado Entrada (m)	Cota zampeado Salida (m)	Profundidad Entrada (m)	Profundidad Salida (m)
C1	47.55	47.50	2.45	2.50
C2	47.19	47.14	2.81	2.86
C3	47.56	47.51	2.44	2.49
C4	47.21	47.16	2.79	2.84
C5	46.91	46.86	3.09	3.14
C6	46.49	46.44	3.51	3.56
C7	47.55	47.50	2.45	2.50
C8	47.20	47.15	2.80	2.85
C9	47.57	47.52	2.43	2.48
C10	47.23	47.18	2.77	2.82
C11	46.06	46.01	3.94	3.99
C.R	45.35	45.35	2.62	2.62
C12	45.23	45.18	2.74	2.79
C.P. Anaerobia	44.72	44.67	0.68	0.73

Tabla 7.- Características cámaras

En la Lamina 4 se puede observar la distribución del sistema de recolección y conducción del lixiviado por módulo.

5 Tratamiento de lixiviados

5.1 Sistema de tratamiento

El tratamiento del efluente se realiza a través de un sistema de lagunas en serie compuesto por:

- Laguna de ecualización
- Laguna anaerobia
- Primer Laguna facultativa
- Segunda Laguna facultativa
- Humedal de flujo vertical

La justificación de la elección del sistema se encuentra en la Sección 5.7 de la Memoria Justificativa. Igualmente a continuación se presentan algunas de las ventajas tenidas en cuenta para la selección del sistema:

- Bajo costo de implantación
- Sistema robusto que no requiere de mano de obra especializada y mantenimiento continuo
- No se requiere de la instalación de equipos electromecánicos para su funcionamiento
- Permiten la remoción de altas cargas orgánicas en el efluente

El la Figura 6se esquematiza el sistema de lagunas, las interconexiones entre ellas y la salida hacia el vertido en el A° Las Maulas.

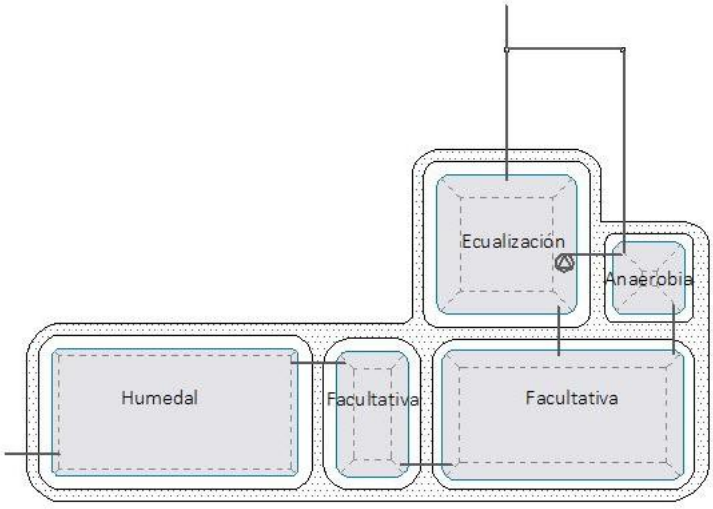


Figura 6.- Esquema del sistema de tratamiento

5.1.1 Ingreso a la planta de tratamiento

El ingreso del efluente a la planta de tratamiento es a partir de una cámara de rebose, diseñada para que en tiempo seco el caudal de lixiviado alimente únicamente el sistema de lagunas de

tratamiento, mientras que en tiempo de lluvias se derive parte del caudal de lixiviado hacia la laguna de ecualización.

Precisamente, la cámara fue diseñada para que el máximo caudal a conducir hacia la laguna anaerobia sea propiamente el máximo caudal de diseño en tiempo seco de todo el sistema de tratamiento, es decir el percentil 90 de la serie de caudales en tiempo seco (Q_{max} diseño = 39,1 m^3d)

La cámara de rebose está conformada por una tubería de entrada, proveniente del sistema de recolección de lixiviados de 250 mm de diámetro y 0,5% de pendiente, una tubería de salida hacia la laguna de ecualización, de 250 mm de diámetro y 0,4% de pendiente y un orificio de salida hacia una tubería de 110 mm de diámetro y 0,5% de pendiente para la conducción del lixiviado base a la laguna anaerobia.

La cámara funciona descargando a través del orificio y por la tubería de ϕ110 hasta la laguna anaerobia para continuar el tratamiento del lixiviado por el resto de las lagunas, en tiempo seco.

Cuando comienza a llover y por lo tanto se genera mayor cantidad de lixiviado, la cámara comienza a llenarse, aumentando el caudal de salida por el orificio, hasta alcanzar el tirante normal en la tubería de salida de ϕ250. La cámara fue diseñada para que en dichas condiciones el máximo caudal de salida por el orificio coincida con el caudal máximo de diseño del sistema de tratamiento en tiempo seco ($Q_{max}^{L.An}$=39,1 m^3/d). Imponiendo esta condición el orificio debe ser de 2 cm de diámetro.

Debido a que el diámetro del orificio es significativamente pequeño, se prevé la colocación un falso fondo para evitar la posible obstrucción del mismo.

En la Tabla 8 se presentan las características y dimensiones de la cámara de rebose

Cámara de rebose	
Diámetro (m)	1
Profundidad (m)	2,6
Zampeado AA tubería de salida (ϕ250): x (m)	0,155
Tirante normal tubería de salida (ϕ250): H-x (m)	0,1499
Zampeado aa tubería de entrada (m)	0,405

Tabla 8.- Características y dimensiones de la cámara de rebose

En las figuras a continuación se presentan los detalles del diseño de la cámara re rebose.

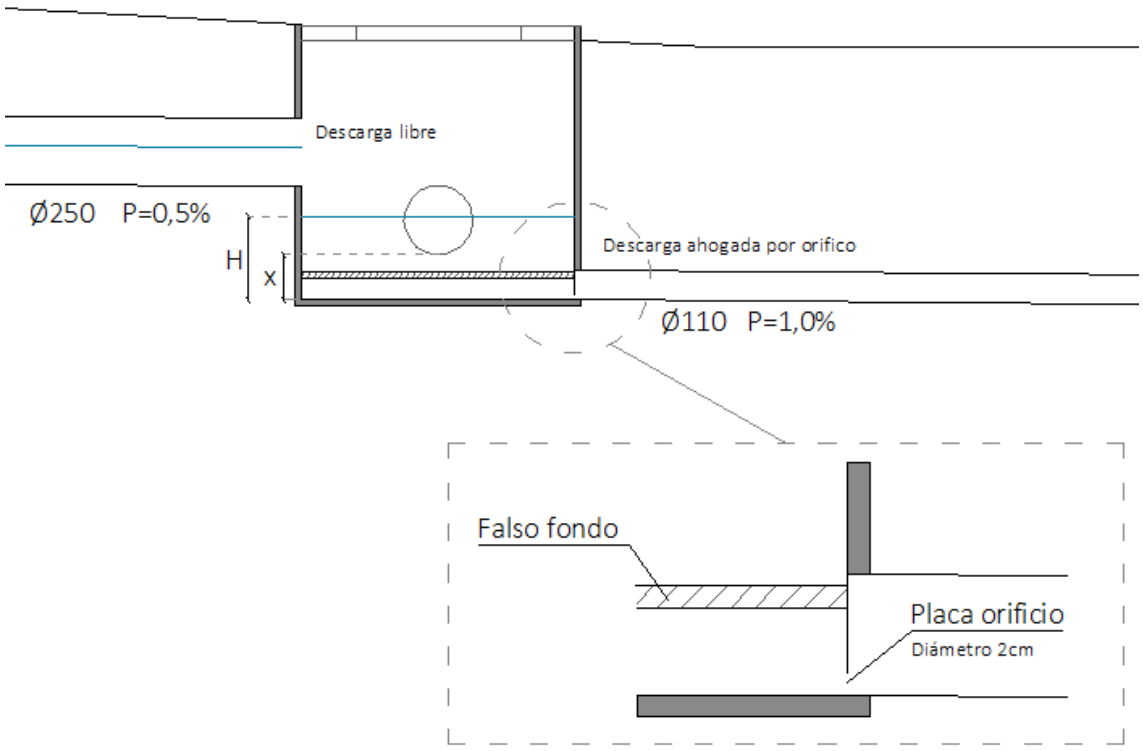


Figura 7.- Corte longitudinal de la cámara de rebose con detalle del orificio de salida

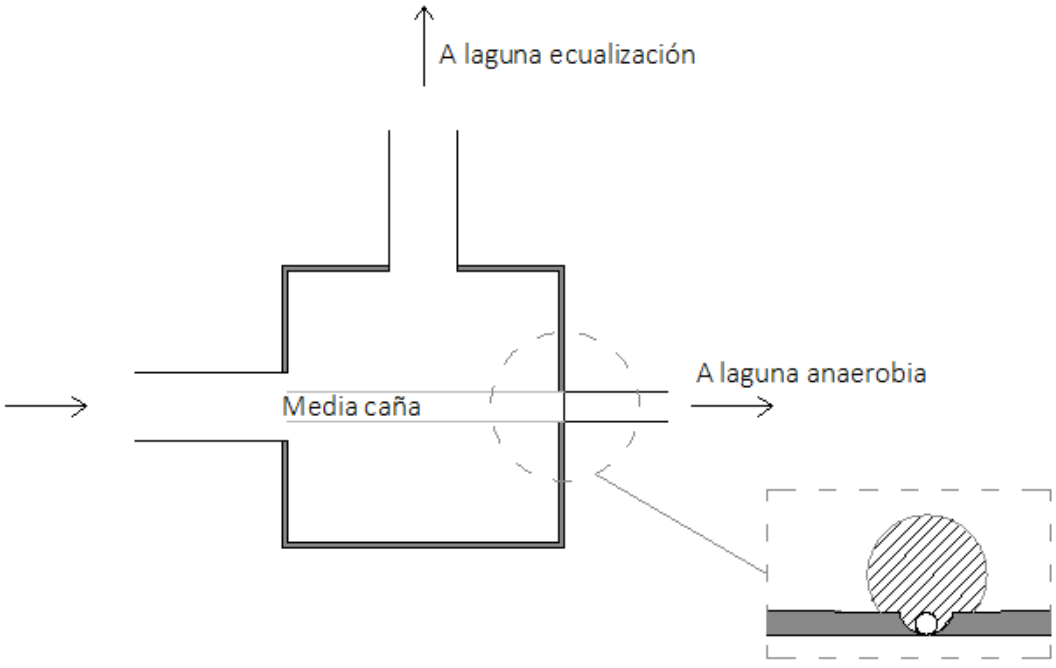


Figura 8.- Corte en planta de la cámara de rebose y detalle transversal del orificio de salida

5.1.2 Conducciones entre las lagunas

Las conducciones fueron diseñadas para evitar el remanso de las mismas debido al desborde en las lagunas, como se detalla en la Memoria de Cálculo, Sección 6.4.

En la Tabla 9se presentan las características de cada interconexión.

Desde	Hasta	Diámetro (m)	Largo (m)	Pendiente (%)
Cámara 12	Cámara previa anaerobia	0.11	49.3	0.5
Cámara previa anaerobia	Laguna Anaerobia	0.11	7.7	1.0
Laguna Anaerobia	Primer Laguna Facultativa	0.16	11.9	0.7
Primer Laguna Facultativa	Segunda Laguna Facultativa	0.2	13.5	0.7
Segunda Laguna Facultativa	Humedal	0.2	14.0	0.7

Tabla 9.- Características conducciones entre lagunas

5.1.3 Laguna de ecualización

Para dimensionar la laguna de ecualización se realizó un balance de paso mensual que se presenta en la Sección 6.2.3.1 de la Memoria de Cálculo. Las dimensiones obtenidas para la laguna se presentan en la Tabla 10.

	Área media (m^2)	Largo medio (m)	Ancho medio (m)	Largo de fondo (m)	Ancho de fondo (m)
Humedal	900	30,0	30,0	24,0	24,0
	Largo superficial (m)	Ancho superficial (m)	Profundidad útil (m)	Profundidad total (m)	Revancha (m)
	36,0	36,0	2,0	3,15	1,15

Tabla 10.- Dimensiones de la laguna de ecualización

La laguna funciona bombeando un caudal máximo de:

$$Q_{max\ ,bomb} = 1326{,}4\ m^3/mes$$

Para ello se dispondrán dos bombas, una en funcionamiento y la otra en reserva. Las características de las bombas se detallan la sección siguiente.

5.1.3.1 Selección de la bomba

Se prevé la instalación de dos bombas de iguales características, las cuales se presentan en la Tabla 11. Ambas bombas seleccionadas son marca DAB modelo NOVA 180.

Los cálculos para la selección de dichas bombas se encuentran detallados en la Sección 6.2.3.1 de la Memoria de Cálculo.

Características Bomba	
Carga (m)	3,7
Caudal (m^3/s)	1,8

Tabla 11.- Características de las bombas

5.1.4 Lagunas de tratamiento

El dimensionamiento de las lagunas se presenta en la Sección 6.2.2 de la Memoria de Cálculo. A continuación se presenta una tabla resume con los parámetros adoptados para el diseño de cada unidad.

	Rango	Caudal de diseño (m^3/d)	Carga de entrada (kg DBO/d)	Carga de aplicación volumétrica (kg DBO/m^3.dia)	Tiempo de retención (días)	Eficiencia en remoción (%)	Concentración de salida (mg DBO/L)
Laguna Anaerobia	Mínimo	8,9	44,5	0,14	35	55	20,0
	Medio	16,8	41,9	0,13	19	55	18,9
	Máximo	39,1	31,3	0,10	8	55	14,1

Tabla 12.- Parámetros de diseño para Laguna Anaerobia

	Rango	Caudal diseño (m^3/d)	Carga de entrada (kg DBO/d)	Carga de aplicación superficial (kg DBO/m^2.dia)	Tiempo de retención (días)	Eficiencia en remoción (%)	Concentración de salida (mg DBO/L)
Laguna Facultativa (primera)	Mínimo	8,9	20,0	0,0118	286	80	450
	Medio	16,8	18,9	0,0111	152	80	225
	Máximo	39,1	14,1	0,0083	65	80	72

Tabla 13.-Parámetros de diseño para la primer Laguna Facultativa

	Rango	Caudal diseño (m^3/d)	Carga de entrada (kg DBO/d)	Carga de aplicación superficial (kg DBO/m^2.dia)	Tiempo de retención (días)	Eficiencia en remoción (%)	Concentración de salida (mg DBO/L)
Laguna Facultativa (segunda)	Mínimo	8,9	4,0	0,0102	66	80%	90
	Medio	16,8	3,8	0,0096	35	80%	45
	Máximo	39,1	2,8	0,0072	15	64%	26

Tabla 14.- Parámetros de diseño para la segunda Laguna Facultativa

En la Tabla 15se presentan las dimensiones obtenidas a partir de los parámetros expuestos en la tabla anterior.

Laguna	Área media (m^2)	Largo medio (m)	Ancho medio (m)	Largo de fondo (m)	Ancho de fondo (m)
Anaerobia	125	11,2	11,2	3,7	3,7
Primer Facultativa	1695	58,2	29,1	53,7	24,6
Segunda Facultativa	391	28,0	14,0	23,5	9,5

Laguna	Largo superficial (m)	Ancho superficial (m)	Profundidad útil (m)	Profundidad total (m)	Revancha (m)
Anaerobia	18,7	18,7	2,5	3,1	0,6
Primer Facultativa	62,7	33,6	1,5	2,4	0,9
Segunda Facultativa	32,5	18,5	1,5	2,6	1,1

Tabla 15.- Dimensiones de las lagunas

5.1.5 Humedal de flujo vertical

El dimensionamiento del humedal de flujo vertical se detalla Sección 6.3.1 de la Memoria de Cálculo. A continuación se presenta una tabla resume con los parámetros adoptados para el diseño del mismo

	Rango	Caudal de diseño (m^3/d)	Carga de entrada (kg N/d)	Carga de aplicación superficial (kg N/ha.dia)	Tiempo de retención (días)	Eficiencia en remoción (%)	Concentración de salida (mgN/L)
Humedal	Mínimo	8,9	3,4	18,8	129,6	85	57,0
	Medio	16,8	3,3	18,8	68,8	85	29,4
	Máximo	39,1	3,6	18,8	29,5	85	13,9

Tabla 16.- Parámetros de diseño para el humedal FSSV

Las dimensiones resultantes son:

	Área media (m^2)	Largo medio (m)	Ancho medio (m)	Largo de fondo (m)	Ancho de fondo (m)
Humedal	1923	62,0	31,0	60,2	29,2
	Largo superficial (m)	**Ancho superficial (m)**	**Profundidad útil (m)**	**Profundidad total (m)**	**Revancha (m)**
	63,8	32,8	0,6	1,8	1,2

Tabla 17.- Dimensiones del humedal FSSV

5.2 Características constructivas

Para evitar la inflación del efluente al terreno y la posible contaminación de la napa se prevé que el fondo de las lagunas sea compactado previamente. Luego preverá un sistema de impermeabilización del fondo y los taludes de la laguna, provisto de una capa de arcilla de 10 cm de espesor sobre la cual se colocara una geomembrana de PVC de 0,8 mm de espesor.

Además, los taludes deben ser protegidos contra erosión mediante una capa de césped, manteniendo una faja libre entre el césped y el nivel de agua dentro de la laguna para evitar el desarrollo de mosquitos. Para ello se prevé la colocación de una placa de hormigón en el punto de contacto con el agua, de 15 cm de espesor y 1 metro de altura (50 cm sumergido y 50 cm libre).

Para evitar cortocircuitos la entrada y salida de cada laguna prevé colocar diametralmente opuesta.

Para evitar el ingreso de los caudales de drenaje superficial, se realizan cunetas perimetrales a la planta de tratamiento, evitando el ingreso del escurrimiento superficial.

Laguna anaerobia:

La entrada a las lagunas anaerobias es de forma ahogada, a 40 cm del zampeado de salida de la tubería, de forma de evitar la rotura de la costra superficial y la posible aireación del líquido. Además se prevé una solera de protección de fondo en el punto de ingreso del caudal.

La salida de la laguna es sumergida a 40 cm del pelo de agua, para evitar la salida de material flotante y se ubica diametralmente opuesta a la tubería de entrada (ver Figura 9)

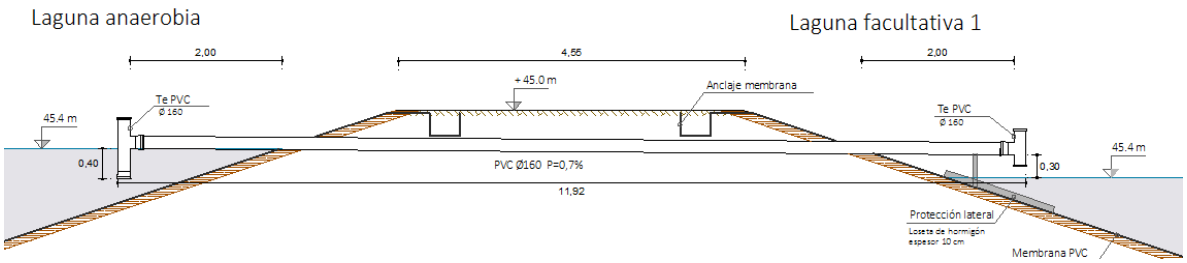


Figura 9.- Salida laguna anaerobia y entrada a primer laguna facultativa

Lagunas facultativas:

La entrada a cada una de las lagunas facultativas se realiza por sobre 30 cm del pelo de agua en la misma, favoreciendo los fenómenos de aireación y el efecto de mezcla con la turbulencia de la caída del efluente.

La salida de la cada laguna se coloca sumergida 40 cm por debajo del nivel del pelo de agua (ver Figura 10)

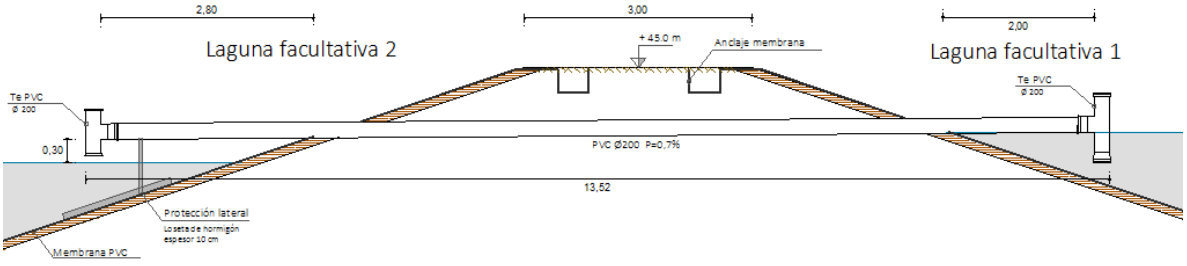


Figura 10.-Salida primer laguna facultativa y entrada a segunda laguna facultativa

5.3 Funcionamiento del sistema

Debido a las variaciones en el caudal de lixiviado durante los periodos secos y cuando ocurren precipitaciones, el sistema de tratamiento tiene dos modos de funcionamiento, como se presentó en la Sección 5.7.2 de la Memoria Justificativa.

5.3.1 Tiempo seco

Mientras no ocurren eventos de precipitación el lixiviado proveniente del relleno evita la laguna de ecualización, ingresando directamente a la laguna anaerobia a través de la cámara de rebose. Luego es conducido hacia la primer laguna facultativa, para luego pasar a la segunda facultativa y terminar su tratamiento en el humedal.

En el esquema que se observa en la Figura 11, las líneas naranjas indican la trayectoria del efluente por todas sus etapas de tratamiento, previo a su vertido al Arroyo.

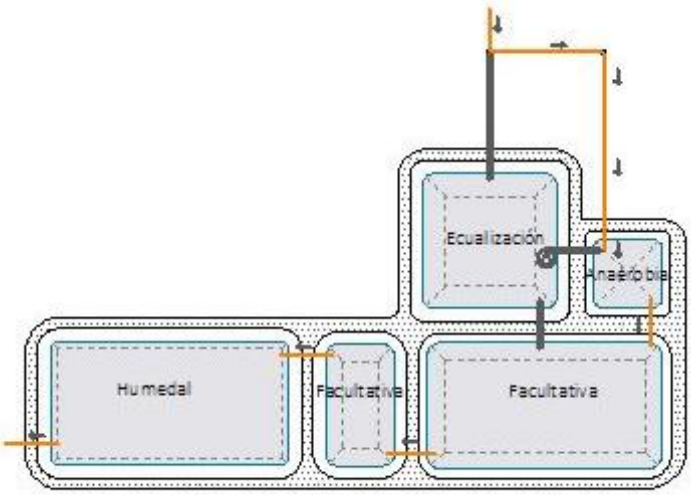


Figura 11.- Esquema del tratamiento del lixiviado en tiempo seco

5.3.2 Tiempo de lluvia

Cuando comienza a llover, al ingresar el lixiviado a la cámara de rebose la misma funciona de forma que parte del caudal es derivado hacia la laguna de tratamiento (limitando por el máximo) y el resto hacia la laguna de ecualización, como se explicó en la Sección 5.1.1.

En este caso, el caudal que es enviado a la laguna de ecualización para luego ser bombeado de forma controlada hacia la laguna anaerobia para continuar el tratamiento por todas las etapas siguientes (anaerobia – primera facultativa – segunda facultativa – humedal – vertido al curso de agua). En la Sección 5.1.3, se explicó el sistema de funcionamiento del pozo de bombeo que se encarga de enviar el efluente desde la laguna de ecualización hacia la laguna anaerobia.

En el esquema que se observa en la Figura 12, las líneas verdes indican la trayectoria del efluente por todas sus etapas de tratamiento, previo a su vertido al Arroyo.

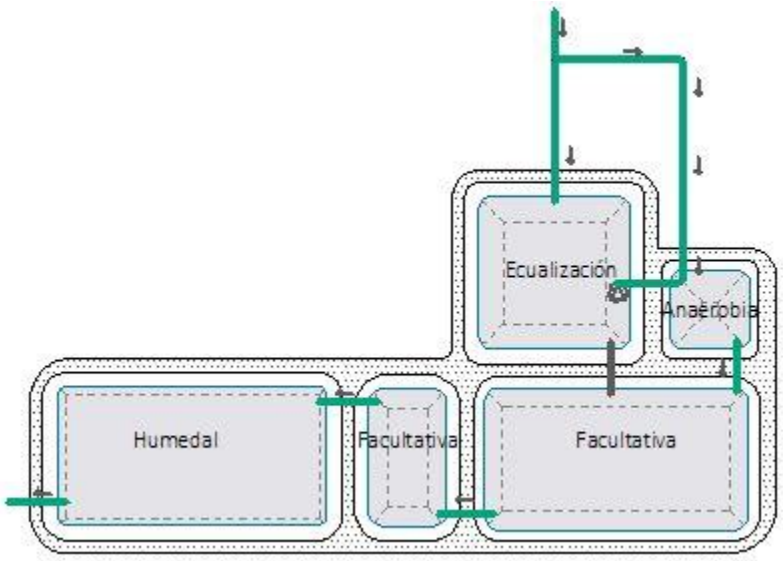


Figura 12.- Esquema del tratamiento del lixiviado en tiempo de lluvia

En el caso particular en que el evento de precipitación sea de una magnitud considerable, de forma de que el caudal de lixiviado que ingresa a la laguna de ecualización supera la capacidad de bombeo, se prevé un vertido hacia la primera laguna facultativa, evitando el desborde de la laguna de ecualización.

En este caso, el esquema de tratamiento sigue lo indicado por las líneas azules en la Figura 13

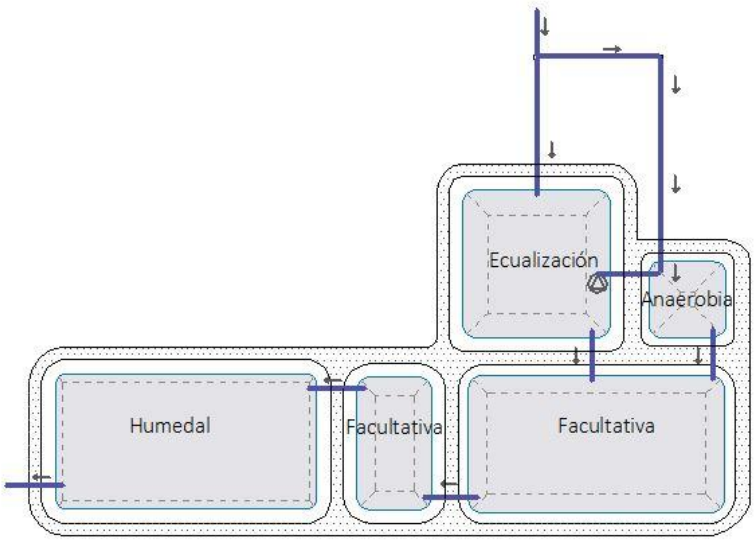


Figura 13.- Esquema del tratamiento del lixiviado durante un evento de gran magnitud

5.4 Descarga de la planta de tratamiento

El efluente a la salida de la planta de tratamiento es conducido y vertido al Arroyo Las Maulas. Para ello se prevé la construcción de un emisario cuyas características se presentan en la siguiente sección.

5.4.1 Emisario

El emisario a construir es PVC de 200 mm de diámetro y tiene una longitud total de 1300 metros hasta el punto de vertido. Se prevén 17 cámaras de inspección cada 100 metros y en los cambios de pendiente del terreno.

Para el evento de 25 años de período de retorno, se tiene que el máximo caudal de salida del humedal es de aproximadamente 0,01 m^3/s, con lo cual la pendiente critica del flujo es de 0,4 %.

Para el diseño del emisario se buscó acompañar la pendiente del terreno evitando el enterramiento del mismo. Para ello se consideró una pendiente mínima de 0,45 %, de forma de siempre estar por encima de la pendiente crítica. Esta condición es debido a que la pendiente del tramo inicial del emisario es del orden de 5 %, con lo cual el régimen de flujo que se da en dicho tramo es supercrítico y se desea mantener de esta forma a lo largo de todo el emisario.

En la Tabla 18 y en la Tabla 19se presentan las características de los tramos de emisario y de las cámaras, respectivamente.

Tramo	Desde	Hasta	Largo	Pendiente (%)	Profundidad Aguas Arriba (m)	Profundidad aguas abajo (m)
E1	13	14	77.2	5.23%	1.16	0.80
E2	14	15	20.8	1.93%	0.85	0.80
E3	15	16	100	1.82%	0.85	0.60
E4	16	17	100	2.02%	0.65	0.60
E5	17	18	18.4	1.91%	0.65	0.60
E6	18	19	79.6	0.50%	0.65	1.05
E7	19	20	100	0.50%	1.10	1.60
E8	20	21	100	0.50%	1.65	2.14
E9	21	22	100	0.45%	2.19	2.16
E10	22	23	100	0.52%	2.21	0.60
E11	23	24	100	2.09%	0.65	0.60
E12	24	25	100	2.13%	0.65	0.60
E13	25	26	100	2.14%	0.65	0.60
E14	26	27	100	3.67%	0.65	0.60
E15	27	28	44.5	4.76%	0.65	0.60
E16	28	29	55.2	0.50%	0.65	0.93

Tabla 18.- Características de los tramos del emisario

Cámara	Cota zampeado Entrada (m)	Cota zampeado Salida (m)	Profundidad Entrada (m)	Profundidad Salida (m)
13	43.29	43.24	1.11	1.16
14	39.20	39.15	0.80	0.85
15	38.75	38.70	0.8	0.85
16	36.88	36.83	0.6	0.65
17	34.80	34.75	0.6	0.65
18	34.40	34.35	0.6	0.65
19	33.95	33.90	1.05	1.10
20	33.40	33.35	1.6	1.65
21	32.86	32.81	2.14	2.19
22	32.37	32.32	2.16	2.21
23	31.79	31.74	0.6	0.65
24	29.66	29.61	0.6	0.65
25	27.48	27.43	0.6	0.65
26	25.29	25.24	0.6	0.65
27	21.57	21.52	0.6	0.65
28	19.40	19.35	0.6	0.65
29	19.07	19.02	0.93	0.98

Tabla 19.- Características cámaras en el emisario

5.4.2 Disposición final

La estructura de descarga del emisario al Arroyo Las Maulas estará dotada de una válvula anti retorno, que impida el ingreso de agua desde el Arroyo al emisario. A su vez, se colocarán rejas, para evitar el ingreso de elementos y una loseta de hormigón o un manto de piedra para proteger el fondo de la socavación y erosión en la salida producto de la descarga. La tubería debe ser anclada a dicha loseta.

6 Captación del biogás y generación de energía

El sistema de captación del biogás está compuesto por un dren encargado de conducir el biogás, y un sistema de bombeo del gas.

Se asumió que la eficiencia en captación del biogás es del 75%, es decir que el 25% del metano generado en la degradación de los residuos no es captado por el sistema, debido a pérdidas o fallas en la operativa.

6.1 Drenes de captación

La extracción del biogás se realizara a través de chimeneas verticales, construidas con tuberías perforadas de PVC de 200 mm de diámetro colocadas en perforación de 80 cm de diámetro y envueltas en una malla conteniendo piedra partida o grava en el espacio anular entre la malla y la tubería, para impedir la colmatación de los orificios por el residuo.

La superficie total de los orificios en la tubería perforada debe ser de 2,5 a 3% de la superficie de tubo. El diámetro de los orificios será menor a 2 cm.

Es importante que la piedra partida o grava utilizada para la construcción de las chimeneas no contenga cal, porque la piedra con cal se descompone fácilmente dentro de la atmosfera agresiva de los gases del relleno. Además se limita el tamaño de las piedras a un mínimo de 5 cm, lo cual impide una rápida colmatación por causa de material espeso o solido que pueda ingresar a la chimenea.

En la Figura 14se presenta un esquema de las chimeneas de drenaje de biogás.

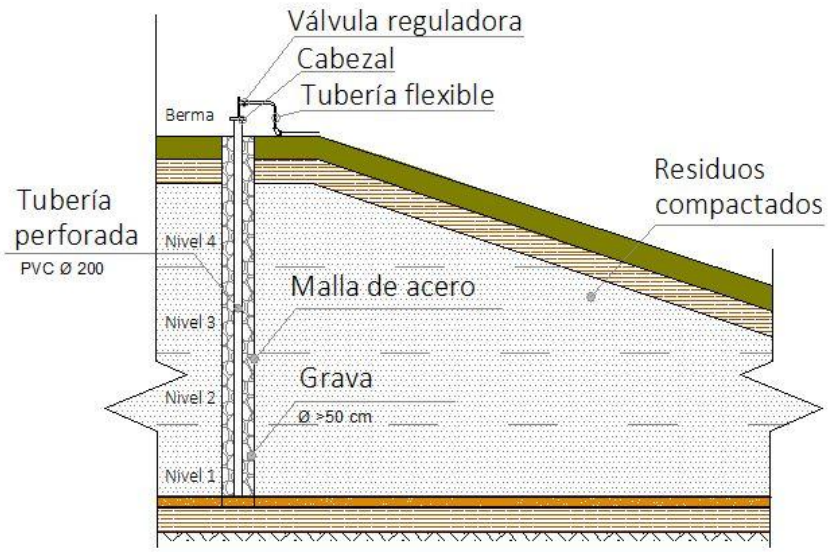


Figura 14.- Detalle del dren de captación de biogás

Las chimeneas serán construidas luego de clausurado el módulo, es decir que cada 5 años se deberá prever la construcción de un sistema de captación de biogás. En la Tabla 20se muestran la cantidad de pozos a construir por módulo

Modulo	N° Pozos sobre nivel final	N° Pozos sobre berma
1	14	24
2	14	28
3	14	28
4	14	28

Tabla 20.- Cantidad de drenes de captación de biogás por módulo

La distribución de las chimeneas dentro de la celda se hace al tresbolillo, asumiendo que el radio de influencia de cada pozo cumple la siguiente relación:

$$R = 1{,}25 \cdot H$$

Siendo:

- Profundidad del dren: H (m)

Se colocaron drenes verticales sobre la superficie de coronamiento de cada módulo, y sobre la berma buscando abarcar mayor área de captación dentro de la masa de residuos.

6.2 Sistema de bombeo

La succión puede realizarse mediante bombas de gas o compresores. Para la elección de la tecnología se deben tener en cuenta los requisitos específicos del sitio como ser la presión requerida para el transporte de gas y la presión de entrada al sistema de recuperación utilizado.

6.3 Conducciones de biogás

Las líneas de conducción del biogás desde los cabezales de los drenes de captación hasta la central de desgasificación se colocan tendidas sobre la tapada final del relleno. Son de PEAD negro PN6, y deben ser dimensionadas de modo de limitar la máxima perdida de carga y velocidad del biogás.

Debido a que las tuberías se encuentran por sobre el terreno, a temperatura ambiente, y el biogás se encuentra a una temperatura mayor, debido a que emana desde la masa residuos, se genera una cantidad importante de condensado que desestabiliza el flujo, la presión y puede llegar incluso a obstruir ramales de conducción. Se debe dar pendiente a la tuberías y en los puntos bajos instalar purgas de condensado que se puede re inyectar en el relleno o enviar a la planta de tratamiento de lixiviado.

La central de desgasificación consta de un colector al que ingresan las líneas de conducción a través de válvulas manuales o automáticas, cuya apertura es función de la calidad del biogás (contenido de CH_4 y O_2). La presión en este colector se debe mantener constante para estabilizar

el sistema, lo cual se logra por medio de una válvula reguladora o de control de velocidad de la soplante. Para la succión se instalan aspiradores centrífugos, cuya presión de salida depende del destino del biogás (quema o generación eléctrica). Es necesario instalar un equipo secador de biogás (en general un enfriador por agua) para quitar el remanente de agua.

Se debe cuidar el rango de operación de la soplante para evitar problemas de cavitación ante bajos caudales de biogás. La instalación eléctrica debe ser anti explosión.

6.4 Antorcha

Se instalará una antorcha cerrada con el fin de reducir las emisiones de metano a la atmosfera en caso que la planta de generación de energía se encuentre fuera de funcionamiento. La misma debe ser capaz que quemar de 98,9 m^3/h, valor asociado al pico de generación de biogás.

6.5 Motores de combustión interna

En función de la cantidad de biogás generado y captado, y la energía eléctrica estimada a generar como se muestra en la Sección 5.10 de la Memoria Justificativa, se determinó la potencia necesaria de los motores, suponiendo que a los 10 años de adquirido el primer motor se realiza una reinversión y se compra un segundo motor. En la Tabla 21se detallan las características de cada motor, su periodo de amortiguación y porcentaje de utilización.

Etapa	Duración (años)	Tecnología	Potencia (kW)	Vida útil del equipo (años)	Utilización
1	10	Combustión interna	130	15	76%
2	11	Combustión interna	150	15	68%

Tabla 21.- Características de los motores seleccionados

7 Drenaje de pluviales

7.1 Cunetas

Se determinó para cada tramo definido de cuneta la geometría de la misma, a partir de una avenida de diseño de 25 años de período de retorno.

Todas las cunetas seleccionadas son empastadas trapezoidales, con taludes 1V:2H y 30 cm de ancho a la base. El resto de las características son presentadas en la Tabla 22.

Tramo	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	H (m)
a	155	0,005	0,4
b	155	0,005	0,5
c	155	0,005	0,4
d	155	0,005	0,4
e	152	0,005	0,4
f	152	0,005	0,5
g	152	0,005	0,4
h	152	0,005	0,4
i	150	0,005	0,4
j	150	0,005	0,6
k	150	0,005	0,5
l	150	0,005	0,4
q	150	0,005	0,6
r	165	0,005	0,6
m	155	0,005	0,4
n	155	0,005	0,6
o	155	0,005	0,6
p	155	0,005	0,6

Tabla 22.- Geometría de las cunetas para el drenaje pluvial

Las secciones empleadas se detallan en la Figura 15 y en la Tabla 23.

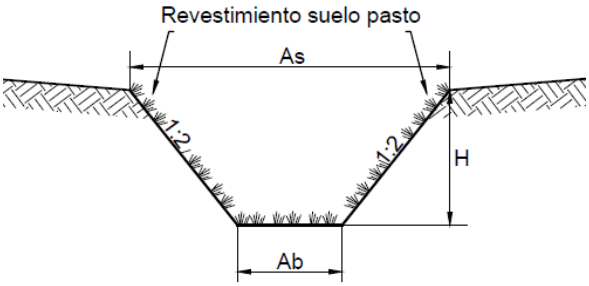


Figura 15.- Cuneta tipo a construir

As (m)	Ab (m)	H (m)
1,9	0,3	0,4
2,3	0,3	0,5
2,7	0,3	0,6

Tabla 23.- Geometría de las cunetas empastadas

7.2 Alcantarillas

Se prevé la colocación de 7 alcantarillas de paso a través de la caminería para comunicar las cunetas entre ellas.

La geometría adoptada para cada alcantarilla se presenta en la Tabla 24, siendo todas de hormigón y de una única boca. Se verificó que para el caudal del diseño de las cunetas (Tr 5 años) no se sobrepase la calle.

Alcantarilla	Caudal (m^3/s)	Diámetro (mm)	Pendiente (%)	Cruce calle	Velocidad (m/s)
1	0.315	500	2,0	No sobrepasa	0.8
2	0.372	500	2,0	No sobrepasa	0.84
3	0.295	500	2,0	No sobrepasa	0.79
4	0.349	500	2,0	No sobrepasa	0.82
5	0.615	600	2,0	No sobrepasa	0.95
6	0.521	600	2,0	No sobrepasa	0.91
7	0.998	800	2,0	No sobrepasa	0.95
8	1.117	800	2,0	No sobrepasa	1.1

Tabla 24.- Características alcantarillas

8 Caminería interna

Dentro del relleno se prevé la construcción de caminos principales y secundarios que permitan circular a los camiones que transportan los materiales, los equipos que realizan las operaciones y el mantenimiento del sitio, y el personal que trabaja dentro del RSa.

Los caminos principales son permanentes, es decir que se mantienen durante todos los años de actividad del RSa, y luego de clausurado el mismo. Estos caminos permiten el acceso y la circulación segura hacia todas las instalaciones.

Por otro lado, los caminos secundarios permiten el acceso temporal a los niveles en explotación. A medida que el frente de trabajo avanza se va cubriendo el camino con los residuos dispuestos, quedando completamente cubierto luego de finalizada la disposición de residuos en un nivel.

Todos los caminos previstos son de tosca compactada y 30 cm de espesor. Los caminos principales tienen 10 metros de ancho, mientras que los secundarios serán construidos de 8 metros de ancho. En particular, la caminería principal de acceso al SDF, en donde se ubican las oficinas, vestuarios, balanza y estacionamiento, se prevé de 17 metros de ancho. En la Tabla 25se presentan los anchos de cada camino.

Camino	Ancho (m)
Acceso	17
Principal	10
Secundario	7

Tabla 25.- Características caminería

Por otro lado, para que los equipos y camiones puedan acceder a todos los niveles dentro de cada módulo desde el camino principal, se proyectaron rampas que comunican los niveles con 10% de pendiente, las cuales pueden ser temporales o permanentes.

9 Instalaciones complementarias y de control

Para realizar la operación del relleno sanitario de forma adecuada, es necesario establecer un control sobre las tareas a realizar a través del personal y de infraestructura correspondiente. Por ello es imprescindible considerar algunas instalaciones complementarias que permitan el correcto desarrollo de las actividades. Dentro de ellas se destaca:

- Caseta de control de ingreso y vigilancia
- Balanza
- Oficinas y vestuarios
- Estacionamiento
- Cerco perimetral
- Cortina arbórea
- Reservorio de agua
- Suministro de energía eléctrica
- Iluminación

9.1 Caseta de control de ingreso y vigilancia

Es necesario el control de los vehículos y el personal que ingresa al sitio, así como la adecuada vigilancia sobre todo el relleno. Para ello se construirá una caseta destinada al control y la vigilancia a la entrada del sitio.

9.2 Balanza

La balanza es necesaria para determinar la cantidad de residuos que ingresan al Relleno Regional. Para ello se instalará una al ingreso del predio.

La balanza tendrá una estructura metálica con un sistema de sensores, que será montada sobre una base de hormigón de al menos 12 de largo. La capacidad mínima de la misma es de 5 toneladas.

9.3 Oficinas y vestuarios

Dentro de las instalaciones se prevé una oficina administrativa, servicios sanitarios, cocina y comedor. Además se incluirán vestuarios para el personal, dotados con duchas, servicios sanitarios y lockers.

El área estimada requerida para estas instalaciones es de 78 m^2

9.4 Estacionamiento

Se deja prevista una zona destinada al estacionamiento vehicular. Dicho estacionamiento se ubicará inmediatamente al ingreso del predio, sobre un costado del camino de entrada. El mismo deberá prever el posible aparcamiento y maniobras de camiones.

Se estima un área necesaria de 520 m^2, previendo 14 plazas de estacionamiento.

9.5 Cerco perimetral

Todo el sitio será circundado por un cerco perimetral de tipo olímpico, con un único acceso a través de un portón ubicado en la entrada al SDF.

La longitud total del cerco perimetral es de aproximadamente 3950 m.

9.6 Cortina arbórea

Se plantará una cortina de especies arbóreas, con el fin de mitigar el impacto visual del relleno, interceptar la voladura de residuos y material particulado producida por la operación, y reducir la dispersión de olores en el entorno.

Se seleccionaran especies de rápida adaptación y crecimiento, para obtener mayor eficacia a corto plazo. Es importante utilizar especies arbustivas conjuntamente con otras arbóreas, de manera de optimizar las funciones de la cortina vegetal.

9.7 Reservorio de agua

Se prevé la instalación de un tanque de agua de 5000 litros de volumen. Se ubicara en un sitio elevado en la zona de las oficinas y vestuarios.

La fuente de abastecimiento del tanque será subterránea, con lo cual se debe instalar un equipo de bombeo desde la perforación hasta el tanque elevado.

9.8 Suministro de energía eléctrica

Se deberá prever el suministro de energía eléctrica al predio, el cual incluye a todas las instalaciones (oficinas, vestuarios, caseta de control, etc), la iluminación de la caminería, iluminación perimetral de los módulos y del predio en general, y también de la planta de generación de energía y de las lagunas de tratamiento.

En particular se debe prever para la planta de generación de energía el suministro necesario de energía eléctrica. En total se estima un requerimiento de potencia instalada de 200 kW aproximadamente.

10 Mano de obra

Las tareas de control, operación y mantenimiento del RSa exigen una plantilla permanente de 20 trabajadores, pudiendo variar levemente según la etapa del relleno.

En la Tabla 26 se presenta el total de la mano de obra requerida para operar el relleno en una jornada (2 turnos) y en la Sección 4.1 de la Memoria de Operación se describen las tareas desarrolladas por el personal

Cargo	Cantidad
Maquinista Compactadora de Residuos	3
Maquinista Pala Cargadora	3
Chofer de Camión	3
Administrativo	2
Coordinador/jefe del RS	2
Técnico / Ingeniero	1
Peones	3
Guardia	3
Totales	20

Tabla 26.- Personal de trabajo del relleno sanitario

11 Clausura del RSa

Luego de alcanzadas las cotas finales proyectadas en cada módulo se clausurará utilizando una cobertura impermeable.

Dicha cobertura está compuesta por la cobertura final de 60 cm de espesor, por encima de ésta se colocará una capa drenante conformada por un geodren sintético de PEAD de 8 mm de espesor. Por último, una capa de suelo de 60cm de espesor con cobertura vegetal sembrada.

El geodren y el suelo vegetal serán extendidos sobre las bermas perimetrales cubriendo todo el talud exterior del módulo. De esta forma se garantiza que el agua de lluvia que precipite sobre la celda e infiltre sin escurrir, sea captado por la capa drenante y conducido hacia el exterior de la celda, sin alcanzar la masa de residuos.

En la Figura 16se presenta un detalle de una celda clausurada.

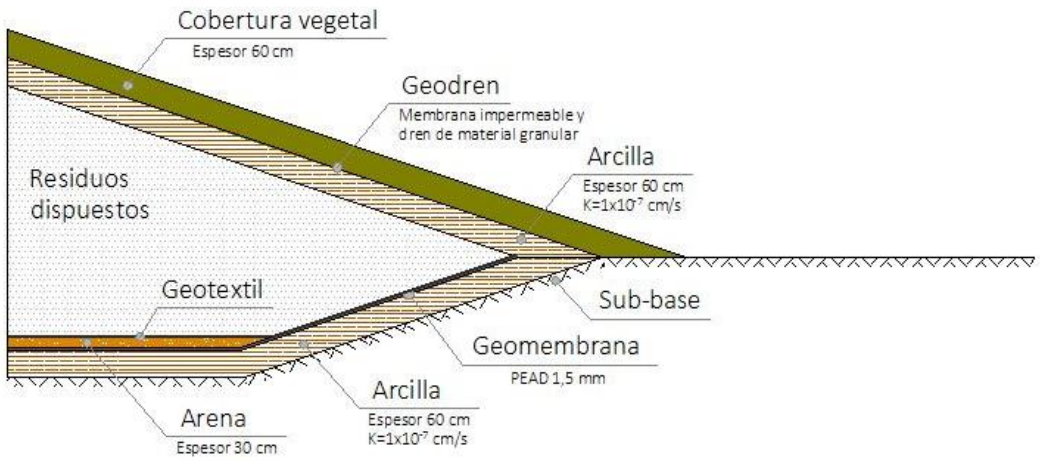


Figura 16.- Detalle de un módulo clausurado

La conformación de los módulos está dada por la cantidad de residuos depositados en cada nivel y la altura alcanzada en los mismos, la cual es determinada a partir de la pendiente de los taludes exteriores, siendo en este caso 1V:3H.

Se prevé la construcción de una berma de 4 metros de ancho antes de alcanzar los 9 metros de altura. En particular, en todos los módulos se alcanzan los 8,4 metros en total luego de colocado el nivel 4, por lo tanto se propone la construcción de la berma por sobre dicho nivel.

En la Figura 17se presenta un esquema de la conformación de un módulo luego de clausurado.

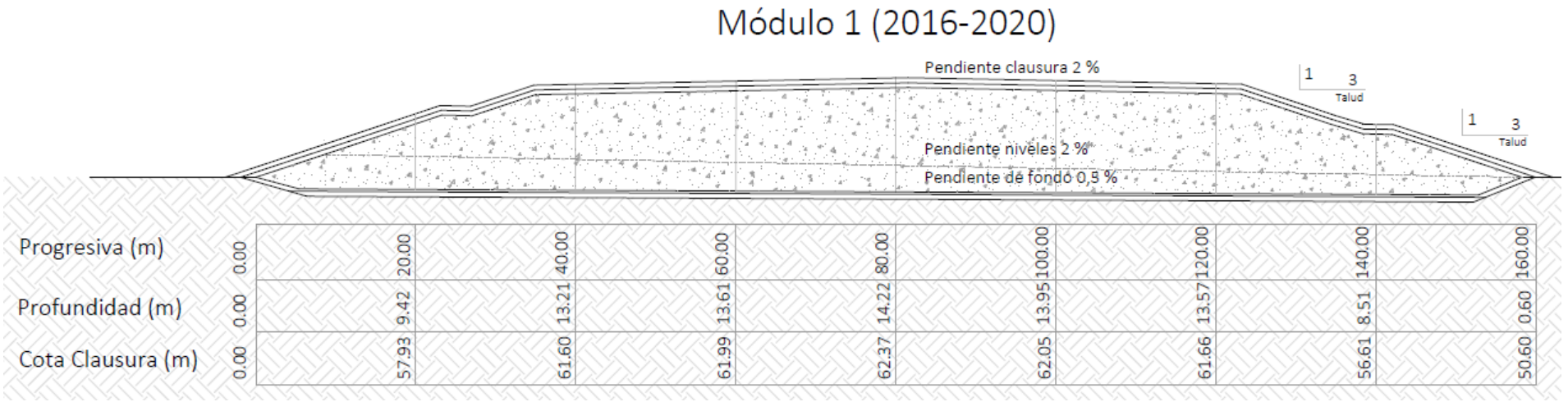


Figura 17.- Esquema del Módulo 1 clausurado

12 Bibliografía

[1] George Tchobanoglous – "Gestión Integral de Residuos Sólidos" –1992

[2] "Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos", Informe 2: Canelones, San José, Melo, Tacuarembó, Salto y Paysandú – LKSur, 2013.

[3] Ing. Wagner Colmenares Mayanga, Ing. Karin Santos Bonillla–Generación y Manejo de Gases en Sitios de Disposición Final

[4] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) – "Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos" –2007

[5] IPCC/OECD/IEA– Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, *"CH_4 Emissions from Solid Wast Disposal".*

[6] Aguiar-Virgen –"Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogas" –2011

[7] U.S. EPA – "Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User´s Guide" –2005

[8] U.S. EPA – "Manual de Usuario Modelo Centroamericano de Biogás" –2007

[9] Pablo Zamonsky, Sebastián Bajsa – Captura y Quema de Biogás en Rellenos Sanitarios y su utilización para la Generación deEnergía Eléctrica. La experiencia del Relleno Sanitario de Las Rosas

[10] Encuestadora ABRELP –"Panorama dos residuos sólidos no Brasil" –2014

[11] FICHTNER-LKSur "Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana" – 2005

[12] María José González – "Proceso técnico y político para la definición de una estrategia para instrumentar una solución consensuada a la disposición final de residuos sólidos urbanos en Uruguay" – 2012

[13] LKSur– "Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos", Informe 2: Canelones, San José, Melo, Tacuarembó, Salto y Paysandú –, 2013

[14] Horacio Terraza, Hans Willumsen–Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization – 2009

[15] U.S. EPA – "Catalog of CHP Technologies"– 2015

[16] CSI Ingenieros, Estudio Pittamiglio – "Información de base para el diseño de un plan estratégico de residuos sólidos" – 2011

[17] Jorge A. Bolaños, Cacho Ruíz – "Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos" – 2001

[18] Ing. Pablo Zamonsky, Ing. Sebastián Bajsa, Ing. Federico Steffenino – Comunicación personal – 2015

[19] SCS Engineers, USA: World Bank – "Comparison of Forecast and Reported Methane Recovery Rates at Selected Landfills in Developing Countries" – 2007.

[20] Terraza, H., H. Guimares y H. Willumsen.. "Design vs. Actual Performance and the Future for CDM Projects" – 2007

Memoria Operativa

Regionalización de Rellenos Sanitarios en el Interior del país, con generación de energía eléctrica



Verónica Garicoits

Luciana Pan

Tutores:

Dra. Ing. Elizabeth González

MSc. Ing. Nicolás Rezzano

Dr. Ing. José Cataldo

Proyecto de Fin de Carrera

Julio 2016

Índice

1 Introducción 4
2 Modalidad y horarios de operación 4
3 Maquinaria y equipamiento 5
4 Recursos humanos 5
4.1 Descripción 6
4.1.1 Jefe del Relleno Sanitario 6
4.1.2 Maquinistas 6
4.1.3 Guardias 7
4.1.4 Peones 7
4.1.5 Administrativo 7
4.1.6 Ingeniero 7
4.2 Medidas de seguridad 8
4.3 Tareas de inspección y supervisión 8
5 Operativa de la maquinaria 9
6 Disposición de los residuos en el relleno 11
6.1 Explotación del relleno 11
6.1.1 Conformación de la celda diaria 12
6.1.2 Material para coberturas diarias e intermedias 15
6.2 Caminería 16
6.3 Control de entrada de camiones y pesaje 17
6.4 Control de descarga de los residuos 19
7 Monitoreo y control 19
7.1 Control de asentamientos 19
7.2 Control de lixiviados 20
7.2.1 Desempeño planta de tratamiento 20
7.2.2 Aguas superficiales 21
7.2.3 Aguas subterráneas 21
7.3 Control del biogás 22
8 Mantenimiento 22
8.1 Mantenimiento del drenaje de pluviales: 22

8.2 Mantenimiento de las áreas verdes 22
8.3 Control de vectores 23
8.4 Mantenimiento de la maquinaria 23
8.5 Mantenimiento de la caminería 23
8.6 Mantenimiento de las instalaciones 24
8.6.1 Balanza 24
8.6.2 Cerco perimetral y portón de acceso 24
8.6.3 Oficinas y vestuarios 24
9 Clausura y mantenimiento Post Clausura 24
9.1 Clausura de los módulos 25
9.2 Mantenimiento Post clausura 25
9.2.1 Control de erosión 25
9.2.2 Mantenimiento del sistema de captación y conducción de aguas superficiales 25
9.2.3 Control de asentamientos post-clausura 25
10 Bibliografía 26

Índice de Figuras

Figura 1.- Compactadora de residuos, CAT 816 F 10
Figura 2.- Pala cargadora montada sobre orugas y camión volcador 10
Figura 3.- Desarrollo y clausura del RSa. Fuente: Gestión Integral de Residuos Sólidos, George Tchobanoglous 13
Figura 4.- Método de área. Fuente: Manual CEMPRE 16

Acrónimos

RS: Residuos Sólidos

RSa: Relleno Sanitario

SDF: Sitio de Disposición Final

GEI: Gas de Efecto Invernadero

PTR: Propuesta Técnica para la Reglamentación

1 Introducción

La correcta operación del relleno sanitario es de vital importancia para que la disposición final de los residuos se realice de forma segura. Por lo tanto es necesario contar con un plan de operación que defina cómo deberán ser realizadas las diferentes tareas de operación y cómo se desarrollará el proyecto desde el inicio de su actividad hasta su clausura. Además, debe considerar también la operación y mantenimiento Post clausura de la planta de tratamiento de efluentes y la planta de generación de biogás.

Si no se efectúa una eficiente supervisión de las actividades y un adecuado mantenimiento, existe la posibilidad de que los procedimientos operativos se vuelvan inadecuados, gestionándose como un vertedero controlado a cielo abierto, con todos los impactos negativos asociados.

2 Modalidad y horarios de operación

El modo de operación y mantenimiento del RSa puede presentar variantes en lo que respecta a su grado de mecanización y turnos de operación. Debido a esto, en la Sección 4.5.3 de la Memoria Justificativa, se realizó un análisis económico de diferentes modalidades de operación para los tres rellenos locales (Mercedes, Fray Bentos y Dolores) y para el relleno regional, a partir del cual se concluyó que la escala del relleno regional justifica la implementación de una operación mecanizada.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta la frecuencia y los turnos de trabajo de la recolección y transporte de residuos ya que estos definirán la cantidad de turnos y días de trabajo del RSa. Según lo desarrollado en la Sección 4.5.2. de la Memoria Justificativa, para las localidades de Mercedes y Fray Bentos es más conveniente realizar la recolección mediante camiones de gran capacidad y dos turnos de recolección, mientras que para Dolores, resulta más favorable optar por una flota de menor capacidad y un turno de recolección

Por lo tanto, el RSa operará durante dos turnos al día con el fin de acomodar su funcionamiento a los horarios de recolección en que se prevé la llegada de los camiones provenientes de las distintas localidades.

3 Maquinaria y equipamiento

Para realizar los trabajos la maquinaria mínima requerida está compuesta por:

Tipo de vehículo	Cantidad	Función
Compactadora de residuos	1	Tender y compactar los residuos Tender y compactar el material de cubrición Trabajos generales de movimiento de tierra
Pala cargadora	1	Carga de materiales a transportar, movimientos de tierra y tareas de apoyo a la compactadora de residuos
Camión	1	Trasportar material en general

Tabla 1.- Maquinaria y vehículos necesarios para la operación

Como maquinara auxiliar para mantenimiento y tareas periódicas se recomienda:

Tipo de vehículo	Cantidad	Función
Motoniveladora	1	Ejecución de tareas de perfilado y mantenimiento de caminería y cunetas de drenaje pluvial
Retroexcavadora	1	Tareas de movimiento de suelo

Tabla 2.- Maquinaria auxiliar para mantenimientos y tareas periódicas

4 Recursos humanos

El personal necesario para realizar el manejo y operación del RSa se seleccionó teniendo en cuenta las diferentes tareas que deben llevarse a cabo. En total se consideró una plantilla de 18 personas, teniendo en cuenta que el RSa funcionará durante dos turnos. A su vez para los maquinistas se consideró un operario adicional, para garantizar la continuidad del trabajo diario de la maquinaria, previendo posibles casos de licencia, días libres, inasistencias, enfermedad etc. dado que realizan una tarea fundamental para que el relleno pueda permanecer en funcionamiento.

Mano de Obra	
Cargo	**Cantidad**
Maquinista Compactadora de Residuos	3
Maquinista Pala Cargadora	3
Chofer de Camión	3
Administrativo	2
Coordinador/jefe del RS	2
Técnico / Ingeniero	1
Peones	3
Guardia	3
Totales	20

Tabla 3.- Recursos humanos

4.1 Descripción

A continuación se describen las funciones que deben ser realizados en cada puesto de trabajo considerado.

4.1.1 Jefe del Relleno Sanitario

El relleno sanitario requiere de una constante supervisión. Por lo tanto, es de gran importancia contar con un jefe o supervisor del RSa quien organiza, dirige y controla las operaciones llevadas a cabo. Es el responsable directo del relleno sanitario y por lo tanto tiene que estar debidamente capacitado. Sus principales funciones son:

- Planificar y controlar el avance del relleno
- Supervisar la extracción de muestras de los pozos de monitoreo y la planta de tratamiento.
- Coordinar y controlar las descargas y compactación de residuos y colocación de la cobertura diaria e intermedia.
- Coordinar operaciones de mantenimiento de la caminería interna
- Coordinar tareas de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de efluentes y planta de biogás

Se contara con dos Jefes del RSa, uno para cada turno de funcionamiento del mismo.

4.1.2 Maquinistas

Son los encargados de manejar las diferentes máquinas empleadas en el RSa; deben tener experiencia y conocimiento en este tipo de trabajos.

Los choferes de las máquinas que operan el relleno, se determinaron en función de la cantidad de máquinas necesarias y las horas de trabajo diario. Para garantizar la continuidad del trabajo diario de la maquinaria, se prevé la contratación de 3 maquinistas por equipo a utilizar en el relleno.

Los equipos previstos para la operación y mantenimiento del SDF son:

Camión
Se encarga del traslado de los RSU y del material de cubrición desde el sitio de acopio hasta el frente de trabajo

Compactadora de Residuos
Se encarga principalmente de las tareas de tendido, empuje y compactación para lograr la densidad adecuada de los residuos y la cobertura, también puede encargarse de tareas de empuje y tendido.

Pala Cargadora

Es la máquina que carga el material necesario para realizar la cobertura diaria al camión que lo transporta hacia el lugar de descarga.

4.1.3 Guardias

Es necesario contar con al menos un sereno por turno que se encargue de la vigilancia del sitio, para impedir el ingreso de personas no autorizadas y animales, controlar las entradas y salidas de vehículos, entre otras.

Las personas encargadas de la vigilancia también deberán realizar recorridos por todas las instalaciones del RSa con el fin de evitar el vertido clandestino de basura, ingreso de clasificadores informales etc.

Se prevé la contratación de 3 guardias para cubrir todos los turnos de trabajo.

4.1.4 Peones

Son los encargados de establecer los límites del frente de trabajo mediante estacas, asistir a los maquinistas en las maniobras que deban realizar, controlar la descarga de residuos, señalización de las chimeneas de gases y otras actividades que determine el Jefe del RSa.

También serán los encargados de mantener las áreas verdes circundantes a las celdas evitando malezas, pastizales y arbustos de cualquier tipo.

Se estima la contratación de 3 peones en total.

4.1.5 Administrativo

Los administrativos realizan las tareas de control de la entrada y salida de vehículos que ingresan al relleno, operar y llevar un registro de la balanza y controlar visual de los residuos ingresados al RSa. También deben brindar apoyo en lo que refiere a actividades administrativas, archivar documentos e información relevante generada durante la operación, controlar las asistencias de los empleados entre otras.

Se prevén 2 administrativos para cumplir con los dos turnos de trabajo del relleno.

4.1.6 Ingeniero

Las tareas a desarrollar comprenden la planificación, supervisión y eventual corrección de los diferentes procedimientos y operaciones llevados a cabo con el fin de lograr un buen funcionamiento del relleno, de acuerdo con las experiencias y la práctica adquirida durante la operación.

También será el encargado de supervisar el funcionamiento de las instalaciones de tratamiento de lixiviado y planta de biogás. Debiendo realizar el monitoreo de las aguas subterráneas y la

producción de biogás, así como también implementar acciones preventivas y correctivas en los casos correspondientes.

Es el responsable de realizar los informes técnicos que se le soliciten del avance de la operación y mantenimiento del sitio.

Se estima la contratación de 2 técnicos.

4.2 Medidas de seguridad

Las medidas de seguridad para los trabajadores del relleno son de especial importancia ya que se encuentran expuestos a riesgos de accidentes de trabajo y de adquirir enfermedades potenciales asociadas con el manejo inadecuado de los residuos.

La posibilidad de contraer una enfermedad o la ocurrencia de un accidente de trabajo puede generarse por incidentes de dos tipos; por condiciones inseguras de trabajo o por negligencia del propio trabajador.

Se debe reducir el tiempo de contacto directo de los trabajadores con los residuos, y de ser necesario realizarlas el trabajador debe contar con un equipo adecuado de protección que le permita realizar la tarea con mínimo riesgo para su salud.

Los elementos fundamentales para la protección de los trabajadores del relleno, incluidos los maquinistas son:

- Uniformes de colores llamativos con cintas reflectivas
- Cascos
- Guantes adecuados para cada tarea a realizar
- Botas de seguridad con puntera y suela reforzada
- Mascarillas
- Asegurar a los operarios una adecuada protección contra el sol y contra el frío

Además se deberá realizar una capacitación permanente de los operarios.

4.3 Tareas de inspección y supervisión

Con el fin de asegurar que las tareas de operación y mantenimiento se lleven a cabo de manera apropiada, es necesario realizar periódicamente la inspección y supervisión de las mismas, minimizando la ocurrencia de posibles errores.

La supervisión se entiende como la acción de observar cómo se realiza un trabajo durante determinado periodo de tiempo con el propósito de que éste se realice correctamente. La inspección es la acción de corroborar que un determinado trabajo ya finalizado, se hizo adecuadamente.

Dentro de las actividades de supervisión se destacan las siguientes:

- Revisar que la zona de disposición diaria esté correctamente identificada por medio estacas indicando los límites de la misma.
- Verificar que se compacten correctamente los residuos y el material de cobertura.
- Verificar que se respete la zona de operación diaria y tener previstas áreas de emergencia para realizar la descarga en casos excepcionales, evitando de esta manera la descarga en lugares inapropiados.
- Corroborar que las actividades de control de acceso, pesaje y registros se realicen adecuadamente.
- Supervisar el control del tipo de residuos que ingresan al relleno con el fin de asegurar que no se reciban residuos industriales no asimilables a urbanos o peligrosos.
- Verificar que el frente de trabaje se encuentre en condiciones operativas aceptables en todo momento
- Mantener el frente de trabajo iluminado en caso que la operación se realice en horario nocturno.

Dentro de las actividades de inspección se destacan las siguientes:

- Verificar buenas condiciones de circulación para los vehículos, para evitar que se entierren y obstruyan el acceso al frente de trabajo.
- Verificar que el tamaño, distribución, forma de las celdas y material de cobertura sigan los lineamientos planteados en el diseño del proyecto.
- Verificar al final de cada jornada que no queden residuos sin cubrir en el frente de trabajo.
- Revisar que las celdas no presentes grietas en la cobertura
- Vigilar constantemente que no existan incendios en el relleno sanitario.
- Verificar el archivo de los registros

5 Operativa de la maquinaria

Las tareas básicas que deben realizar la maquinaria y vehículos para disponer los residuos consisten en el tendido, compactación y transporte de los residuos y material de cobertura.

La maquinaria seleccionada para realizar dichas tareas incluye una compactadora de residuos, pala cargadora y un camión.

La compactadora de residuos es una máquina diseñada especialmente para operar en rellenos sanitarios, pudiendo alcanzar densidades de compactación del orden de 950 kg/m^3. Como se puede apreciar en la Figura 1, está dotada con una hoja topadora y ruedas con puntas de acero que permite realizar las tareas de tendido y compactado de grandes volúmenes de residuos.



Figura 1.- Compactadora de residuos, CAT 816 F

Si bien la compactación se puede realizar utilizando maquinaria más liviana y aumentando el número de pasadas, se optó por un equipo más efectivo, ya que la compactación es de gran importancia debido a los efectos que genera principalmente sobre la vida útil del RSa, la ocurrencia de asentamientos y los procesos de degradación que tienen lugar en la masa de residuos, que condicionan el desempeño de la planta de biogás.

La pala cargadora y el camión se encargan de la carga y transporte del material de cobertura desde el sitio de acopio al frente de trabajo.





Figura 2.- Pala cargadora montada sobre orugas y camión volcador

Se optó por una pala cargadora frontal montada sobre oruga ya que le confiere mayor estabilidad para trasladarse sobre la masa de residuos. Es una máquina de gran versatilidad capaz de realizar diferentes tareas y servir para tareas de apoyo a la compactadora.

El camión está dotado de una caja metálica con volcadora, y una capacidad mínima de 10 m^3, su tarea principal es realizar el transporte del material de cubrición desde el sitio de acopio, donde es

cargado por la pala, hasta el frente de trabajo, donde lo descarga en el punto que sea indicado por el operador de la compactadora.

6 Disposición de los residuos en el relleno

6.1 Explotación del relleno

El relleno se explotará en cuatro etapas, conformando módulos de 5 años de vida útil. Para cada módulo, los métodos empleados en lo que respecta a la operación del relleno dependerán del nivel que se encuentre activo.

Cada módulo cuenta con cinco niveles, los cuales fueron diseñados para completarse con los residuos que ingresan en un año de operación. El método de vertido seleccionado es combinado, comenzando con el método de celda excavada para el primer nivel y posteriormente se continúa con el método de zona para los niveles superiores.

Por lo tanto, para el primer nivel, inicialmente es posible realizar la compactación de los residuos contra el talud inclinado de la excavación, de pendiente 3:1, esto permite obtener mejores rendimientos respecto a las densidades alcanzadas. Sin embargo, a medida que se avanza el efecto de compactación contra el talud disminuye y por lo tanto la operación se realiza con compactación horizontal.

Para el llenado de los niveles superiores que se encuentran sobre el nivel del terreno la compactación se realiza horizontalmente en todo momento ya que no existen taludes que ofrezcan soporte para la compactación.

El fondo terminado de los módulos tiene una pendiente de 1 % en el sentido que se conducen los lixiviados. Por lo tanto, en el primer nivel el avance se realizará desde el nivel más alto (“cabecera”) hacia la zona más baja; de esta manera, la lluvia que cae sobre el módulo puede escurrir y se evita su estancamiento en el frente de trabajo.
En este caso particular, en que el frente de operación se encuentra por debajo del terreno, se prevén instalaciones de drenaje de las aguas superficiales a lo largo del perímetro del módulo para evitar el ingreso del escurrimiento externo. Igualmente, la lluvia que cae directamente sobre el módulo no puede escurrir hacia el exterior, por lo que debe ser captada y conducida por los drenes de lixiviado, los cuales fueron diseñados para poder desagotar el volumen correspondiente a una tormenta de diseño de 25 años de periodo de retorno y 20 minutos de duración, en aproximadamente 9 horas.

En caso que ocurra este tipo de eventos, los residuos son cubiertos provisoriamente con un film de polietileno, el jefe del relleno será el encargado de informar a los operarios las tareas que deben ser realizadas en caso que se decida suspender la operación en el frente de trabajo.

En el caso de los niveles superiores, se razona análogamente, avanzado desde la zona alta hacia la baja, por lo cual las celdas diarias que se van conformando en el primer nivel, se diseñan con una

pendiente de la superficie superior de entre 2 % y 5 %, para favorecer el escurrimiento pluvial del siguiente nivel, y así sucesivamente. En este caso, la lluvia que cae sobre el módulo y no infiltra a través de la cobertura diaria puede escurrir hacia el exterior del módulo siendo captada por el sistema de drenaje pluvial.

6.1.1 Conformación de la celda diaria

La disposición de los residuos en los módulos se realiza en celdas comenzando a lo largo de la cara de compactación y siguiendo hacia afuera y hacia arriba a partir de dicha cara, como se muestra en la Figura 3. Se define como “celda diaria” a los residuos dispuestos en el relleno durante un día.

La descarga en el frente de trabajo debe ser supervisada por el personal asignado, de manera que los residuos se distribuyan homogéneamente en el área delimitada para la operación diaria. Una vez indicado el lugar y realizada la descarga, los residuos se esparcen en capas de 45 – 60 cm. Luego se compactan hasta alcanzar una densidad de 700 kg/m^3 y hasta alcanzar un volumen previamente definido. El número de pasadas que realice la compactadora de residuos definirá la compactación de los mismos, para lograr la densidad definida, basándonos en experiencias de RSa de características similares, serán necesarias alrededor de 15 pasadas, insumiendo un tiempo de operación de entre 4 y 5 horas.

Al final de cada día de operación, se cubren todas las superficies externas de los residuos previamente compactados con una capa de arcilla o tierra de 20 cm, conformándose la celda diaria.

Repitiendo la operación a lo largo de los días se forman franjas formadas por celdas adyacentes con una misma altura, luego, el conjunto de franjas de igual altura que completan la zona activa del vertedero conforman un nivel. Se colocan niveles sucesivos, uno encima de otro, hasta llegar al nivel final previsto en el proyecto

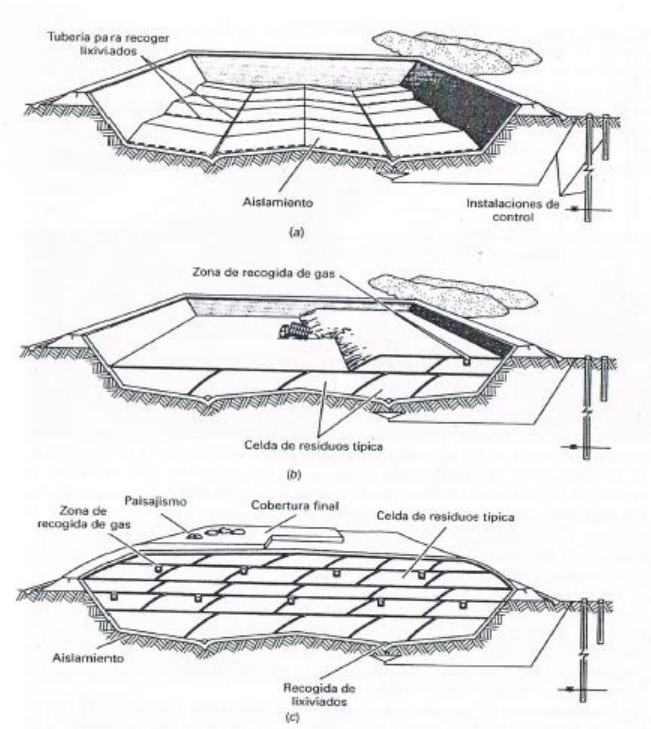


Figura 3.- Desarrollo y clausura del RSa. Fuente: Gestión Integral de Residuos Sólidos, George Tchobanoglous

La altura de las celdas queda definida por la altura del nivel correspondiente, para todos los módulos. En el caso del último nivel se supera la altura máxima de celda recomendada[1], [2] por lo tanto se realizarán dos niveles intermedios hasta llegar a la altura propuesta en el diseño. A su vez, el ancho de las celdas se supuso de 6 m, de manera que se conformen franjas estrechas y largas minimizando las idas y vueltas que debe realizar la compactadora.

El avance y volumen de cobertura diaria varía a lo largo de la vida útil del RSa, en función de la cantidad de residuos a disponer y la altura de celda proyectada para cada nivel, en la Tabla 4, se presentan los valores a lo largo de los años.

El volumen de cubrición diaria se calculó considerando una cubrición de espesor 0,2 m, y el área a cubrir se determinó como la suma del área superficial, transversal frontal y transversal lateral. Por otro lado, la cubrición intermedia se calculó considerando un espesor de 0,3 m que cubre la totalidad del área superior correspondiente a cada nivel.

Los resultados del volumen de cubrición diaria e intermedia presentados en la Tabla 4, están expresados en m^3 compactados.

[1] Alturas normales de las celdas varían de 2,4 a 3,6 m

Modulo	Año	Volumen diario de RSU (m^3/día)	Altura celda (m)	Avance diario (m)	Volumen cubrición diaria (m^3)	Volumen de cubrición intermedia (m_3/año)
1	2016	62,1	1,8	8,2	17,8	7512
	2017	62,5	1,8	8,2	17,8	6515
	2018	62,9	2,1	7,0	16,1	5427
	2019	63,3	2,7	5,6	14,5	4207
	2020	63,7	2,3	6,6	15,7	2061
			2,3	6,6		
2	2021	64,1	1,8	8,5	18,3	7750
	2022	64,5	1,8	8,5	18,3	6737
	2023	64,9	2,1	7,2	16,6	5633
	2024	65,4	2,7	5,9	14,9	4399
	2025	65,8	2,2	7,0	16,4	2237
			2,2	7,0		
3	2026	66,2	1,8	8,8	18,8	7997
	2027	66,6	1,8	8,8	18,8	6967
	2028	67,1	2,1	7,5	17,1	5847
	2029	67,5	2,6	6,1	15,4	4598
	2030	67,9	2,2	7,5	17,1	2418
			2,2	7,5		
4	2031	68,4	1,8	9,0	19,3	8252
	2032	68,8	1,8	9,0	19,4	7205
	2033	69,3	2,1	7,8	17,6	6068
	2034	69,7	2,6	6,3	15,8	4803
	2035	70,2	2,1	7,9	17,8	2605
			2,1	7,9		

Tabla 4.- Avance y volumen de cubrición diaria por nivel

También se debe controlar el desarrollo de las celdas y avance del relleno, prestando especial atención en los siguientes aspectos:

- Pendientes de los taludes de la masa de residuos, los cuales deben mantenerse entre relaciones 3H:1V, o menores.

- Posibles eventos de fugas no controladas de gas y lixiviado que puedan comprometer la estabilidad de la masa de residuos. Las fugas de gas se pueden detectar controlando los equipos de medición de caudal o mediante el olfato, las fugas de lixiviado pueden ser detectadas a través del correcto monitoreo de la calidad del agua subterránea.

- Colocar losas para el control de asentamientos que serán utilizadas para el relevamiento topográfico que se realizará anualmente en el caso de los módulos activos y cada dos años para los clausurados. Permitiendo detectar asentamientos y también comprobar que el avance del relleno se esté desarrollando según lo establecido en el diseño.

6.1.2 Material para coberturas diarias e intermedias

La cubrición diaria se realiza con el objetivo de controlar el vuelo de materiales, prevenir la entrada o salida de vectores sanitarios que no pueden tener acceso fácil a los residuos, así como también reducir al máximo la cantidad de residuos expuestos al ambiente. Controlando de esta manera, la infiltración de agua a través de los residuos durante la operación, y la liberación de gases, que se producen durante la degradación de los residuos, a la atmosfera, en especial el metano por ser un GEI. En los casos excepcionales que por las condiciones climáticas no sea posible la colocación de la cobertura diaria, se utilizará un film de polietileno para cubrir las celdas, como se mencionó anteriormente.

La cobertura intermedia sirve como medio soporte para la colocación del siguiente nivel proporcionando una zona segura para el tránsito de maquinaria y camiones.

El material utilizado para las coberturas será el excedente proveniente del movimiento de suelos, de la construcción de los módulos y lagunas de tratamiento, dicho material será acopiado en una zona determinada cercana a los módulos para minimizar las distancias de traslado.

Se realizó un balance de material, presentado en la Tabla 5, con el fin de calcular la relación entre el material obtenido de la excavación y la demanda de cobertura, permitiendo evaluar la necesidad de buscar una zona de préstamo para la extracción de material. El balance se encuentra expresado en términos de material suelto, es decir el volumen correspondiente al transporte del mismo.

Se observa que el material obtenido por la excavación de un módulo logra cubrir aproximadamente un 88% del volumen total de coberturas diaria e intermedia necesarias durante el período de actividad de dicho módulo. Luego, se tuvo en cuenta el volumen obtenido a partir de la excavación de las lagunas de estabilización, resultando necesario extraer de una zona de préstamo un volumen total de 40.181 m^3, que de acuerdo con el avance previsto será necesitado para realizar la cobertura intermedia del módulo 4.

Balance material de cubrición (m^3 suelto)							
	Excavación módulos	Cobertura diaria	Cobertura intermedia	Balance	Excavación/Cobertura (%)	Excavación lagunas	Préstamo necesario
Módulo 1	84130	55335	40011	-11217	88%	9530	-40181
Módulo 2	86805	57207	41622	-12024	88%		
Módulo 3	89568	59155	43286	-12873	87%		
Módulo 4	92420	61011	45.007	-13598	87%		

Tabla 5.- Balance material de cubrición

6.2 Caminería

La caminería dentro del RSa está compuesta por caminos principales y secundarios. Los principales permiten el acceso y circulación segura a todas las instalaciones. Estos caminos son permanentes, es decir se mantienen durante los años de actividad del RSa, así como también luego de ser clausurado.

Los caminos secundarios son aquellos que permiten el acceso temporariamente a los niveles en explotación. En este caso, a medida que el frente de trabajo avanza se va cubriendo el camino por los residuos dispuestos, quedando tapado completamente una vez comenzada la explotación del siguiente nivel. En los primeros niveles, se debe tener en cuenta que el tránsito de las máquinas y camiones sobre el fondo del módulo podría afectar el sistema de recolección y conducción de lixiviados, debido a las tensiones transmitidas al suelo por el peso de los mismos. Por ello, en la Sección 5.1.4. de la memoria de cálculo, se verificó que dichas tensiones no perjudiquen el sistema.

La caminería se proyectó en tosca compactada con un espesor de 30 cm, con previo destape de la cobertura vegetal y colocación de 30 cm de arcilla, los caminos permanentes se diseñaron con un ancho de 10 m y en particular el camino principal de acceso al relleno sobre el cual se ubican la balanza y oficinas tiene un ancho de 17 m, mientras que la caminería secundaria que da acceso temporario a los módulos se diseñó con 8 m de ancho.

Por otro lado, el acceso de la maquinaria y camiones desde el camino principal a los diferentes niveles de los módulos, se realiza mediante rampas, las cuales también pueden ser temporales o permanentes. Las pendientes admisibles para las rampas dependen principalmente del estado de los vehículos y la carga de los mismos; para el diseño se consideró un máximo de 10 %, [5].

Como se mencionó anteriormente, para el primer año de actividad de cada módulo, el nivel se encontrará excavado y por lo tanto la rampa se comunica con el nivel descendiendo desde el camino principal, como se muestra en el esquema de la Figura 4. Dicha rampa es de carácter temporal ya que, al igual que los caminos secundarios, se verá cubierta por los residuos dispuestos el primer año. Para los siguientes niveles, que se encuentran por encima del nivel del terreno se proyecta una rampa permanente la cual va avanzando progresivamente junto con los niveles.

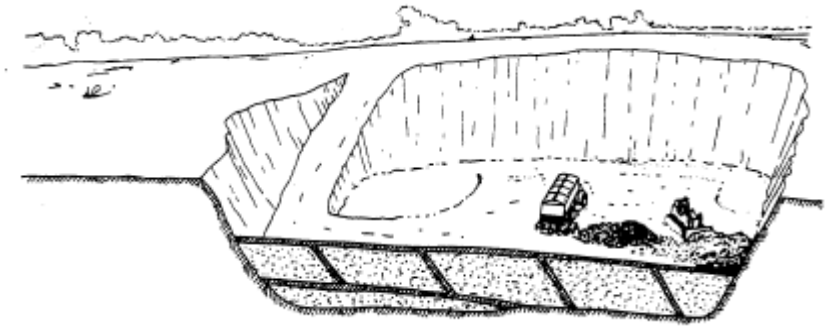


Figura 4.- Método de área. Fuente: Manual CEMPRE

Es fundamental realizar la colocación y compactación de la cobertura intermedia luego de cada nivel, pudiendo ser reforzada con tosca en lugares donde se considere necesario, con el fin de establecer una capa soporte para el tránsito de los camiones y maquinaria en el frente de trabajo y de esta manera asegurarse que el tránsito sobre el nivel anterior sea seguro.

Los caminos internos deben ser mantenidos permanentemente para evitar problemas de acceso o atascamiento de las unidades, lo cual provocaría la interrupción de las operaciones diarias. Por lo tanto, se deberá mantener todos los tamos de caminería que se vean deteriorados por el tránsito y la lluvia, tantas veces como sea necesario.

6.3 Control de entrada de camiones y pesaje

Previo a la entrada de los camiones de residuos, es indispensable realizar el pesaje y registro de los mismos, de manera que se pueda conocer la cantidad de residuos que ingresan al RSa como un parámetro de control.

Se debe registrar el peso de la tara y peso del vehículo, matrícula, procedencia, hora de entra y salida y cualquier otra información que pueda ser relevante.

En este caso, la balanza se ubicó en la calle principal de acceso al predio. Una vez pesado, el camión se realiza una inspección visual por personal idóneo, con el fin de detectar y evitar el ingreso de residuos no admisibles en el RSa. Luego se le indicará la zona donde realizar la descarga en el frente de trabajo, lugar en el cual se realizará una segunda revisión del contenido descargado.

El relleno fue diseñado para disponer únicamente residuos domésticos, quedando estrictamente prohibida la disposición de los siguientes residuos, establecidos en los criterios de admisión para la disposición final de la Propuesta Técnica para la Reglamentación (DINAMA 2003):

- "*Residuos contaminados provenientes de los Centros de Atención de Salud de acuerdoa lo establecido en el Decreto 135/99.*
- *Neumáticos usados enteros.*
- *Líquidos o con líquidos libres.*
- *Gases comprimidos.*
- *Materiales solubles en agua.*
- *Explosivos, corrosivos, oxidantes e inflamables.*
- *Contaminantes orgánicos persistentes.*"

En la PTR 2003 también se presentan criterios respecto a las condiciones básicas que deben cumplir los residuos para poder ingresar a sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos:

Sobre la composición:

- *"Ser residuos de la categoría III ([2]).*
- *No contener ninguna sustancia o compuesto que en las condiciones de operación del relleno altere el normal funcionamiento del mismo."*

Sobre el estado físico

- *"Los residuos deberán ser sólidos o semisólidos, con una humedad máxima de 80 % en peso.*
- *Ausencia de líquidos libres.*
- *Los residuos a disponer no deberán alterar el funcionamiento normal del relleno sanitario, debiendo sus características físicas hacerlo compatible con las condiciones de operación del relleno sanitario.*
- *Los residuos no deberán ser potencialmente generadores de olores que alteren la operación normal del relleno sanitario.*
- *En el caso que el residuo sea un producto de consumo humano o animal deberá desnaturalizarse en forma previa a la disposición final. Las pautas de desnaturalización serán establecidas en cada caso por la Intendencia correspondiente."*

Volumen del residuo

- *"El volumen de residuos a disponer deberá ser tal que no altere significativamente la vida útil del relleno sanitario en el caso que los residuos a ingresar no hayan sido considerados en su diseño. Como guía se debe considerar que no podrán ser recibidos por parte de la Intendencia volúmenes de residuos industriales superiores a 10 % en peso de la cantidad diaria de residuos sólidos urbanos recibidos en el sitio de disposición final. La autorización de volúmenes superiores quedará condicionada a un análisis previo por parte de la DINAMA sobre la capacidad de recepción del relleno sanitario.*
- *En caso de superar el volumen máximo, la Intendencia podrá aceptar la partida siempre y cuando el interesado cuente con aprobación previa de la DINAMA.*
- *La Intendencia deberá presentar informes anuales a la DINAMA detallando las autorizaciones de ingreso de residuos industriales.*
- *En el caso de residuos que se proceda a disponer en forma esporádica, el volumen de los mismos no deberá ser superior al 10 % de la cantidad mensual de residuos sólidos urbanos recibidos por el sitio de disposición final. En caso de superar dicha capacidad, el interesado deberá tramitar la solicitud particular ante la DINAMA."*

Los residuos que cumplen con las condiciones anteriormente detalladas pueden ser considerados como asimilables a urbanos y por lo tanto, podrán ingresar al RSa sin necesidad de presentar autorización de la DINAMA, a continuación se presenta la lista de residuos presente en la PTR:

[2] Forman parte de la categoría III todos aquellos residuos que no presenten ninguna de las características establecidas en las categorías I y II, definidas en la Memoria de Estudios Básicos

- *"Residuos generados en instalaciones industriales, comerciales y/o de servicios que provengan de áreas administrativas y/o servicios generales como áreas destinadas a la preparación, venta, o suministro de alimentos al personal, servicios de aseo, etc.*
- *Residuos de embalaje secundarios de cualquier producto o materia prima siempre y cuando no presente contaminación del producto o materia prima y cumpla con las condiciones anteriores.*
- *Residuos de embalaje primario de productos o sustancias destinadas a la alimentación de los seres humanos o animales.*
- *Residuos provenientes de la industria alimentaria siempre y cuando no correspondan a residuos de productos químicos.*
- *Residuos consistentes en bienes de consumo que no presenten ninguna de las condiciones que involucre que se encuentren en la categoría I y II.*

Otros residuos que no estén en la lista anterior deberán – para ser considerados como potenciales a ingresar a la codisposición con los residuos sólidos urbanos – contar con una autorización previa de la DINAMA."

6.4 Control de descarga de los residuos

Durante la descarga de los residuos en el frente de trabajo, el operario encargado de indicar el lugar de la descarga realizará un control visual del contenido, de manera de poder identificar la presencia de residuos potencialmente peligrosos tanto para los operarios como para el medio ambiente.

En el caso de detectar residuos de este tipo, se deberá comunicar al jefe de turno para que tome las acciones inmediatas en relación a los procedimientos a seguir. Asimismo, iniciará las acciones correspondientes para identificar al responsable generador, procedencia del residuo y responsable por el transporte del mismo, utilizando los registros generados en el control de la entrada al RSa.

7 Monitoreo y control

7.1 Control de asentamientos

El asentamiento del relleno se produce por el efecto de la descomposición del material orgánico, que pierde parte de su peso en forma de biogás y lixiviado, así como también por la sobrecarga generada por el incremento del peso de la columna de residuos dispuestos en los niveles superiores.

También pueden darse asentamientos diferenciales en distintas zonas del relleno, los cuales generan problemas de encharcamiento del agua aumentando la infiltración en la masa de residuos. Los asentamientos diferenciales se asocian principalmente al tráfico vehicular, compactación irregular y heterogeneidad de las características de los dispuestos en diferentes zonas.

El fenómeno de asentamiento muchas veces puede ser identificado por observación directa de la zona afectada. Algunos de los indicadores son el agrietamiento de la cobertura, depresiones, fracturas profundas y estancamiento de agua.

Las acciones principales que permiten minimizar los efectos del asentamiento son la adecuada compactación de los residuos, la separación de materiales voluminosos, nivelación de las áreas para favorecer los escurrimientos y evitar la acumulación de agua, entre otras.

La cuantificación de los asentamientos se realiza mediante relevamientos topográficos que determinan los descensos utilizando placas de asentamiento. Estas placas consisten en planchas construidas de hormigón que se colocan sobre la superficie del relleno cada 50 m aproximadamente. El control se continúa realizando una vez clausurado el módulo hasta que se dé la estabilización del nivel de la masa de residuos, momento en el cual los asentamientos comienzan a ser despreciables.

7.2 Control de lixiviados

Se realizará el control del lixiviado a través de la medición de diferentes parámetros a la entrada y salida de la planta de tratamiento con el fin de controlar su desempeño. También se controlará el impacto sobre la calidad de aguas subterráneas y superficiales, para las cuales se tomarán muestras en los pozos de monitoreo y en el cuerpo de agua receptor.

La toma de muestras previo a la entrada al tratamiento, se prevé en la cámara de rebose la cual está dotada de una placa orificio que regula el caudal conducido a la laguna anaerobia, se colocará allí una regla fija que permitirá registrar los niveles en dicha cámara y tomar las muestras correspondientes. Por otro lado, las muestras del efluente tratado serán tomadas en una cámara ubicada en la salida del sistema.

7.2.1 Desempeño planta de tratamiento

Se realizarán controles visuales diarios, por el técnico responsable de la planta de tratamiento, en los que se analizará:

- Aspectos organolépticos
- Nivel de agua en las lagunas de tratamiento
- Estado de tuberías y cámaras

Para el control del desempeño de la planta de tratamiento se realizarán a la entrada y salida de la planta. Se analizarán mensualmente los siguientes parámetros:

- DQO: Demanda Química de Oxígeno
- SST: Sólidos Suspendidos Totales
- SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles
- pH
- Grasas y aceites

- Temperatura
- Conductividad

Con una frecuencia cuatrimestral se analizaran además de los parámetros mensuales:

- DBO_5: Demanda Bioquímica de Oxígeno
- PO_4: Fosfato
- NTK: Nitrogeno total Kjeldahl
- NH_4: Amonio
- NO_3^- y NO_2^-: Nitratos y Nitritos
- Cr^{+6}: Cromo
- Pb: Plomo
- Cd: Cadmio
- Fe: Hierro
- F: Fluor
- Cu:Cobre
- Zn: Zinc

7.2.2 Aguas superficiales

Se realizarán análisis semestrales en el curso de agua receptor del vertido, el Arroyo Las Maulas. A su vez, previo al inicio de las actividades, se deben realizar análisis para tener información de base sobre la calidad del curso. Los puntos de muestreo se ubican en los límites del predio, aguas arriba y aguas abajo del vertido.

En caso que se obtengan valores anómalos que indiquen una posible contaminación del curso, como primera medida se repetirá el análisis, y de ser confirmado el valor se identificará el problema en el sistema de tratamiento con el fin de aplicar acciones correctivas.

Con frecuencia cuatrimestral se registrarán los valores del Arroyo correspondientes a:

- Caudal del Arroyo
- Aspecto
- Olor
- Temperatura
- pH
- Conductividad

Con frecuencia semestral se realizan todos los análisis indicados para la planta de tratamiento con frecuencia semestral.

7.2.3 Aguas subterráneas

La supervisión de las aguas subterráneas permite detectar cambio en su calidad, que pueden presentarse por eventos de fugas de lixiviado y gases del RSa. Para efectuar dicho control, se prevé

la construcción de pozos de monitoreo, los cuales serán perforados hasta el nivel de la napa freática.

Los pozos serán ubicados teniendo en cuenta el sentido del flujo de agua subterránea, ubicando al menos uno aguas arriba del RSa y dos aguas abajo.

Los análisis se realizarán cuatrimestralmente evaluando todos los parámetros indicados con igual frecuencia para la planta de tratamiento.

7.3 Control del biogás

Es necesario controlar el movimiento de los gases dentro del RSa para reducir las emisiones atmosféricas, minimizar la generación de olores y la migración subsuperficial del gas.

La tasa de extracción debe ser controlada cuidadosamente por el Técnico/Ingeniero responsable de la planta de biogás, ya que la sobre carga puede causar que el aire procedente del suelo circundante infiltre a través de la masa de residuos. Debido a esto el sistema se encuentra equipado con válvulas controladoras del flujo y tomas de muestreo para detectar posibles ingresos de aire.

En lo que respecta al sistema de recuperación de energía, es necesario controlar la temperatura de combustión en especial si el gas contiene ácido sulfhídrico (H_2S) para evitar problemas de corrosión.

8 Mantenimiento

Las principales actividades en lo que refiere al mantenimiento que deberán ser realizadas para el correcto funcionamiento del RSa son las siguientes:

8.1 Mantenimiento del drenaje de pluviales:

Parte de la lluvia que cae sobre los módulos escurre y es captada por el sistema de drenaje pluvial que está compuesto por cunetas que la conducen. Dichas cunetas deben ser mantenidas rutinariamente libres de elementos que puedan disminuir su capacidad de conducción. Además, de detectarse efectos erosivos o deterioro de las mismas, deben ser acondicionadas con el fin de restablecer su condición inicial.

8.2 Mantenimiento de las áreas verdes

Las áreas verdes constituyen un elemento esencial en la estética del lugar y del paisaje, además de brindar una buena imagen del acceso y oficinas. Para su mantenimiento se prevén las siguientes tareas:

- Poda periódica, de al menos una vez al año, de los árboles que integran la barrera arbórea proyectada.

- Aplicación de herbicidas en las áreas circundantes a los módulos con el fin de evitar el crecimiento de malezas, pastizales y arbustos. Se debe tener especial atención y cuidado en la aplicación para que el producto no alcance las lagunas de tratamiento ya que afectaría su funcionamiento
- Mantenimiento de las áreas con cobertura vegetal

8.3 Control de vectores

El control de presencia de vectores se realizará a partir de insecticidas de alto poder residual y en caso de proliferación ocasional se aplicarán insecticidas de alto poder de vaporización.

Para mantener el control sobre los vectores biológicos y prevenir su proliferación se deben tener estrictas condiciones de limpieza en el sitio. Algunas de las actividades que se deben realizar para prevenir estas situaciones son las siguientes:

- Cubrir diariamente los residuos dispuestos en el RSa
- Limpieza e higiene del predio en general: Limpieza diaria de oficina y vestuarios, evitar la acumulación de herramientas y/o materiales en desuso, mantener el predio sin malezas ni pastizales altos, evitar agua estancada en el sitio y residuos sólidos fuera del relleno sanitario.
- Realizar fumigaciones y desratizaciones con una frecuencia de 6 meses. Para dichas tareas se recomienda contratar personal especializado

8.4 Mantenimiento de la maquinaria

El correcto funcionamiento de la maquinaria es indispensable para la operación del relleno. Por lo tanto con el fin de evitar interrupciones y retrasos es necesario realizar revisiones y mantenimiento constante, cuidar la maquinaria en la operación evitando que trabaje sobreexigida, cambiar las piezas que así lo requieran y seleccionar un maquinista que además de tener experiencia en la operación de equipos sea capaz de realizar reparaciones pequeñas de las máquinas.

Los maquinistas serán los responsables de gestionar con una frecuencia adecuada las actividades relacionadas al mantenimiento como ser: cambios de filtros, cambio de aceite, engrasado, ajuste de partes móviles, etc.

A su vez, se preverá un mantenimiento preventivo completo por un técnico capacitado, al menos una vez al año.

8.5 Mantenimiento de la caminería

El mantenimiento de caminos internos es de gran importancia ya que éstos deben asegurar la accesibilidad y circulación segura en el relleno en cualquier época del año. Los caminos se ven

deteriorados por diferentes factores como tránsito de camiones y la lluvia, por lo que se debe prever su mantenimiento tantas veces al año como sea necesario.

Las tareas correspondientes al mantenimiento comprenden las tareas de suministro, colocación y compactación de tosca.

8.6 Mantenimiento de las instalaciones

8.6.1 Balanza

El mantenimiento de la balanza para realizar el pesaje de los camiones que ingresan al relleno, comprende las siguientes tareas:

- Calibración semestral del equipo
- Mantenerla libre de residuos, lodos, etc.
- Pintarla al menos una vez al año con pintura antióxido

8.6.2 Cerco perimetral y portón de acceso

El cerco perimetral y portón de acceso deberán ser revisados y reparados en caso de ser necesario de manera que pueda cumplir la función de impedir el paso de animales y personas no autorizadas al RSa.

8.6.3 Oficinas y vestuarios

El mantenimiento de las oficinas y vestuarios básicamente contempla las tareas de limpieza diaria general, para mantener la higiene de los locales y prevenir afectaciones a la salud y trabajo del personal, así como también la limpieza del depósito elevado.

A su vez, deben realizarse tareas de mantenimiento general de la estructura, pintar la fachada y muros, verificar el correcto funcionamiento de las instalaciones hidráulicas, eléctricas y sanitarias.

En particular, los días que las condiciones climáticas impidan la operación en el frente de trabajo se podrán realizar tareas de mantenimiento de maquinaria e instalaciones que lo requieran, limpieza del tanque de agua e inspección de las cámaras, entre otras.

9 Clausura y mantenimiento Post Clausura

El RSa fue diseñado previendo cuatro etapas de módulos sucesivas, lo que implica que una vez alcanzada la capacidad máxima de un módulo el mismo debe ser clausurado y dar paso a la operación en el siguiente.

Los primeros cinco años las tareas serán únicamente de mantenimiento del módulo en actividad, pero a partir de la clausura del mismo, comenzarán a superponerse con las actividades correspondientes al mantenimiento y control post clausura.

9.1 Clausura de los módulos

La clausura de los módulos tiene por objetivo minimizar los impactos de los RS y los subproductos generados por las reacciones de descomposición que continúan teniendo lugar dentro del relleno. Se toman medidas con el fin de prevenir la infiltración de la lluvia a través de los residuos, favorecer el escurrimiento superficial hacia el exterior del módulo, prevenir la erosión de la cobertura final y la fuga de biogás.

Durante el proceso de clausura, se deberá:

- Colocar cartelería que indicando la clausura del módulo y la localización del nuevo módulo activo para la disposición de los residuos
- Cubrir el módulo con una capa impermeable, compuesta por arcilla compactada y material sintético, sobre la capa impermeable colocar el sistema de drenaje (geodren) y por último una capa de suelo con cobertura vegetal
- Comenzar las obras de extracción de biogás, construyendo los pozos e instalando las tuberías de recolección.

9.2 Mantenimiento Post clausura

9.2.1 Control de erosión

Para controlar la erosión se debe realizar el mantenimiento rutinario de la vegetación, controlar la infiltración y escorrentía mediante la limpieza de los canales de drenaje. El mantenimiento de la cobertura vegetal incluye el desmalezado y limpieza de la vegetación sembrada.

9.2.2 Mantenimiento del sistema de captación y conducción de aguas superficiales

Comprende el mantenimiento de toda la infraestructura vinculada con la captación, conducción y evacuación del agua superficial. La limpieza de las cunetas se realizará cada 30 días y/o cada vez que ocurran eventos de lluvia que puedan ocasionar el arrastre de materiales y obstruir las conducciones.

9.2.3 Control de asentamientos post-clausura

Los asentamientos diferenciales que se dan en el RSa pueden generar excesivas deformaciones y tensiones, que comprometan la impermeabilidad de cobertura final. Además provoca la formación de depósitos de agua, que deben ser evacuados y rellenados para evitar su acumulación y la consecuente destrucción de la vegetación.

10 Bibliografía

[1] Compromiso Empresarial para el Reciclaje (CEMPRE) – "Residuos Sólidos Urbanos - Manual de Gestión Integral"– 1998

[2] George Tchobanoglous – "Gestión Integral de Residuos Sólidos" –1992

[3] "Manual para la operación de rellenos sanitarios" – SEDESOL – 2006

[4] "Propuesta Técnica para la Reglamentación – Gestión Integral de residuos sólidos industriales y agroindustriales y de servicios" – Documento versión 16/06/03

[5] Jorge Jaramillo – "Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales"

Memoria de Cálculo

Tomo 1: Generación de energía y Análisis de regionalización

Regionalización de Rellenos Sanitarios en el Interior del país, con generación de energía eléctrica



Verónica Garicoits

Luciana Pan

Tutores:

Dra. Ing. Elizabeth González

MSc. Ing. Nicolás Rezzano

Dr. Ing. José Cataldo

Proyecto de Fin de Carrera

Julio 2016

Índice

1 Generación de energía a partir del biogás 6
1.1 Comparación de los diferentes modelos 6
1.1.1 Caracterización de la localidad del SDF 6
1.1.2 Estimación estequiométrica 7
1.1.3 Modelos de primer orden y multifase 10
1.1.4 Modelos de orden cero 16
1.2 Generación de energía a partir del biogás 20
1.2.1 Tasa de crecimiento poblacional 20
1.2.2 Tasa de generación de residuos 22
1.2.3 Calculo del Poder Calorífico Inferior (PCI) del Biogás 24
1.3 Análisis de viabilidad de generación de energía a partir del biogás de un Relleno Sanitario en funcionamiento 25
1.3.1 Generación de energía 25
1.3.2 Costos de inversión y operación y mantenimiento 27
1.3.3 Análisis financiero 28
2 Análisis de regionalización 36
2.1 Regionalización Preliminar 36
2.1.1 Costos de transporte 36
2.1.2 Costos por disposición final 37
2.1.3 Determinación de la distancia máxima 38
2.2 Análisis de costos para la región seleccionada 39
2.2.1 Inversión del RSa 39
2.2.2 Recolección y transporte 63
2.2.3 Operación y mantenimiento del RSa 70
4- Anexos 77
a. Resultados de los modelos de generación de biogás 77
b. Regionalización preliminar 86
i. Determinación de la distancia máxima a recorrer por localidad 86

Índice de Tablas

Tabla 1.- Población....6
Tabla 2.- Caracterización de residuos....7
Tabla 3.- Gas generado....8
Tabla 4.- Resultados del modelo estequimétrico....9
Tabla 5.- Datos de entrada, LandGEM....10
Tabla 6.- Resultados del modelo LandGEM....11
Tabla 7.- Datos de entrada, modelo General....11
Tabla 8.- Resultados del modelo General (primer orden)....12
Tabla 9.- Datos de entrada, Modelo Centroamericano....13
Tabla 10.- Resultados del modelo centroamericano (dos fases)....13
Tabla 11.- Datos de entrada,....14
Tabla 12.- Resultados del modelo IPCC (primer orden)....15
Tabla 13.- Datos de entrada....15
Tabla 14.- Resultados del modelo IPCC (multifase)....16
Tabla 15.- Datos de entrada....17
Tabla 16.- Resultados del modelo IPCC (multifase)....17
Tabla 17.- Resultados del modelo EPA (orden cero)....18
Tabla 18.- Datos de entrada....19
Tabla 19.- Resultados del modelo SWANNA (orden cero)....19
Tabla 20.- Tasa de crecimiento anual para distintas poblaciones....21
Tabla 21.- Tasa de generación de residuos para distintas poblaciones....23
Tabla 22.- Componentes del biogás....24
Tabla 23.- Cálculo del PCI a partir de los componentes del biogás....24
Tabla 24.- Producción de biogás para distintas poblaciones....26
Tabla 25.- Máxima potencia a instalar según tecnología empleada....27
Tabla 26.- Máxima energía eléctrica anual según tecnología empleada....27
Tabla 27.- Costos asociados a la inversión de la planta de generación de energía....27
Tabla 28.- Costos inversión, módulos 1 año....30
Tabla 29.- Altura útil de los módulos para cada escala....31
Tabla 30.- Capacidad y utilización equipos, módulos 1 año....31
Tabla 31.- Préstamo del banco y cuota de devolución al banco, módulos 1 año....32
Tabla 32.- Resumen análisis financiero- Financiación propia sin IRAE, módulos 1 año....32
Tabla 33.- Resumen análisis financiero- Financiación mixta con IRAE, módulos 1 año....33

Tabla 34.- Altura útil de los módulos 5 años para cada escala 34
Tabla 35.- Costos inversión, módulos 5 años 34
Tabla 36.- Capacidades y utilización, módulos 5 años, módulos 5 años 35
Tabla 37.- Préstamo del banco y cuota de devolución al banco, módulos 5 años 35
Tabla 38.- Resultados análisis financiero- Financiación propia sin IRAE, módulos 5 años 35
Tabla 39.- Resultados análisis financiero-Financiación mixta con IRAE, módulos 5 años 35
Tabla 40.- Costos por km 36
Tabla 41.- Rendimientos 37
Tabla 42.- Datos considerados 37
Tabla 43.- Distancia máxima de transporte 38
Tabla 44.- Datos rellenos locales y regional 40
Tabla 45.- Implantación de obra 41
Tabla 46.- Relaciones entre estados de los materiales 44
Tabla 47.- Costo unitario, maquinaria 44
Tabla 48.- Costo unitario limpieza y acopio de la capa vegetal 45
Tabla 49.- Costo unitario, excavación 45
Tabla 50.- Costo unitario, terraplenado 46
Tabla 51.- Costo unitario, limpieza capa vegetal 46
Tabla 52.- Costo unitario, colocación de arcilla 47
Tabla 53.- Costo unitario, colocación de tosca 47
Tabla 54.- Costo unitario, arcilla compactada 48
Tabla 55.- Costo unitario, manto de arena 48
Tabla 56.- Costo unitario, arcilla compactada 57
Tabla 57.- Costos unitarios, tierra vegetal 57
Tabla 58.- Resumen inversión 62
Tabla 59.- Distancias al RSa 63
Tabla 60.- Capacidad y cantidad de camiones por localidad, Relleno regional sin ET 66
Tabla 61.- Capacidad y cantidad de camiones por localidad, Relleno local 66
Tabla 62.- Capacidad y cantidad de camiones por localidad, Relleno regional con ET 68
Tabla 63.- Camiones compactadores 68
Tabla 64.- Inversión, estación de transferencia 69
Tabla 65.- Salarios recursos humanos 69
Tabla 66.- Costos por km 69
Tabla 67.- Rendimientos 69
Tabla 68.- Costos operación y mantenimiento, ET 70

Tabla 69.- Costo, maquinaria y vehículos....71
Tabla 70.- Cantidad maquinaria....71
Tabla 71.- Salarios, recursos humanos....72
Tabla 72.- Cálculo de la amortización por equipo....72
Tabla 73.- Cálculo del avance y del volumen de material necesario para la cubrición diaria de los residuos por localidad....73
Tabla 74.- Cálculo de utilización de los camiones....73
Tabla 75.- Rendimientos combustible....73
Tabla 76.- Costo de la maquinaria, por localidad....74
Tabla 77.- Mantenimiento de caminería....74
Tabla 78.- Costos mantenimiento de la caminería....74
Tabla 79.- Costo del monitoreo ambiental....75
Tabla 80.- Costos operación y mantenimiento según turnos y grado de mecanización....75
Tabla 81.- VAN OyM durante el período analizado (20 años)....76

1 Generación de energía a partir del biogás

1.1 Comparación de los diferentes modelos

A partir de diferentes modelos se estimó la generación de biogás en un mismo caso de estudio. Los resultados anuales de cada modelo son presentados en el anexo 3.1.A su vez, la descripción detallada de cada modelo se presenta en la Sección 2.5 de la Memoria de Estudios Básicos, también se pueden consultar las Fichas resumen de los modelos de biogás, las cuales fueron elaboradas con el fin de proporcionar información resumida y esquemática de cada modelo estudiado.

1.1.1 Caracterización de la localidad del SDF

A continuación se detallan los cálculos realizados para cada uno de los modelos aplicados al caso de un RSa ubicado en la ciudad de Rivera.

Los datos a considerar para la aplicación de los diferentes modelos, que se detallan en la sección 2.1.1,Memoria Justificativa, se presentan a continuación.

Tasa de generación:0,87 kg/hab/día

Población

Año	Población	Año	Población
2011	64.465	2024	66.467
2012	64.672	2025	66.567
2013	64.868	2026	66.832
2014	65.053	2027	66.981
2015	65.228	2028	67.131
2016	65.394	2029	67.280
2017	65.552	2030	67.430
2018	65.704	2031	67.579
2019	65.849	2032	67.729
2020	65.988	2033	67.878
2021	66.119	2034	68.028
2022	66.243	2035	68.178
2023	66.359		

Tabla 1.- Población

Composición de los residuos:

Composición de los residuos: Composición (%) peso	
Plásticos	16,0 %
Vidrio	3,5%
Textiles	3,5%
Metales	2,9%
Papel **Cartón**	14,6%
Materiales orgánicos	41,7%
Madera, ramas de árboles	3,4%
Cuero, goma	1,7%
Otros	12,4%

Tabla 2.- Caracterización de residuos

1.1.2 Estimación estequiométrica

Para la estimación del biogás generado, este método considera constantes determinadas experimentalmente a partir de RSU con propiedades potencialmente diferentes a los generados en Uruguay, extraídas del libro "Gestión Integral de Residuos Sólidos", George Tchobanoglous.

Se determinó el volumen potencial de biogás utilizando la ecuación estequiométrica correspondiente a la degradación anaerobia, considerando los constituyentes orgánicos (exceptuando los plásticos).

Los residuos son clasificados en dos fracciones en función de su velocidad de biodegradación, aquellos que se descomponen rápidamente (entre 3 y 5 meses): materiales orgánicos, papel y cartón, y aquellos que se descomponen lentamente (hasta 50 años): textiles, goma, cuero, madera y ramas de árboles.

(%) Rápidamente degradables	**56%**
(%) Lentamente degradables	9 %

Cabe destacar que los valores hallados teóricamente representan las cantidades máximas de biogás que podría producirse bajo condiciones óptimas. En general en los vertederos la humedad disponible es insuficiente para permitir la degradación completa de los constituyentes orgánicos biodegradables de los RSU. Debido a esto se considerará que un 75% de la fracción rápidamente biodegradable y un 50% de la fracción lentamente biodegradable estarán disponibles para ser degradados.

En la Tabla 3 se presenta el biogás obtenido en Normal metro cúbico por kilogramo (Nm^3/kg), luego de aplicar la suposición anterior.

	% Disponible para ser degradado	Gas generado teóricamente (Nm^3/kg)	Gas real generado (Nm^3/kg)

Rápidamente	0,75	0,87	0,65
Lentamente	0,5	1,03	0,52

Tabla 3.- Gas generado

Es posible determinar los m^3 de biogás generados por determinada cantidad de residuos depositada en el año i (R_i) como:

$$Q_{biog\ ás,i} = R_i(kg) \cdot \left(0.56 \cdot 0.65\left(\frac{m^3}{kg}\right) + 0.09 \cdot 0.52\left(\frac{m^3}{kg}\right)\right)$$

Una vez conocida la cantidad de residuos correspondiente a cada fracción es posible estimar la cantidad de gas generado basándonos en un modelo triangular.

En el caso de los materiales rápidamente degradables la tasa pico de producción de gas se da un año después de ser dispuestos y luego comienza a decrecer linealmente hasta el quinto año.

Por otro lado, para los materiales lentamente degradables la tasa pico de producción de gas se da cinco años después de ser dispuestos y luego comienza a decrecer linealmente hasta los quince años.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

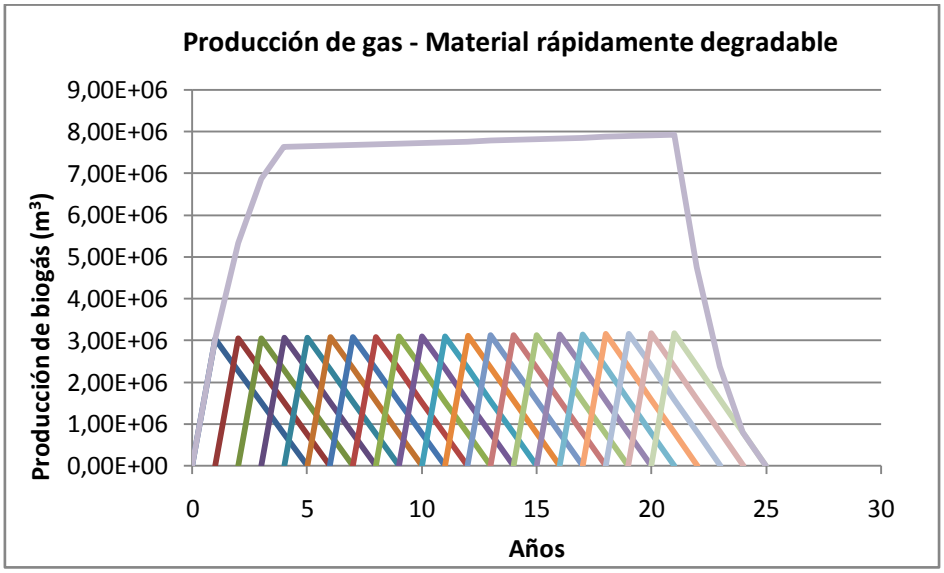


Gráfico 1.- Producción de gas - Material rápidamente degradable

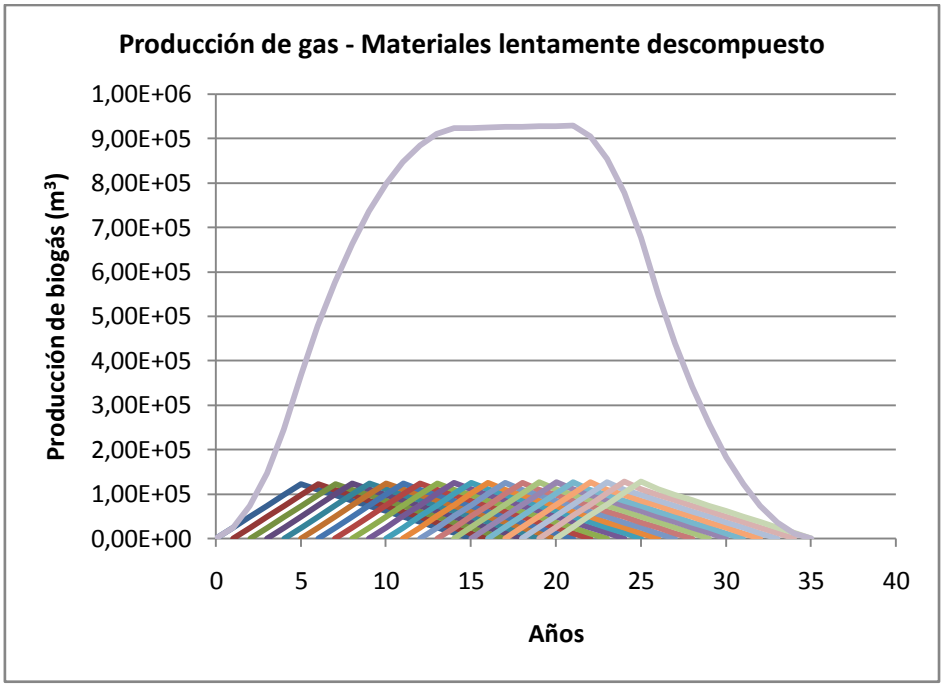


Gráfico 2.- Producción de gas – Material lentamente degradable

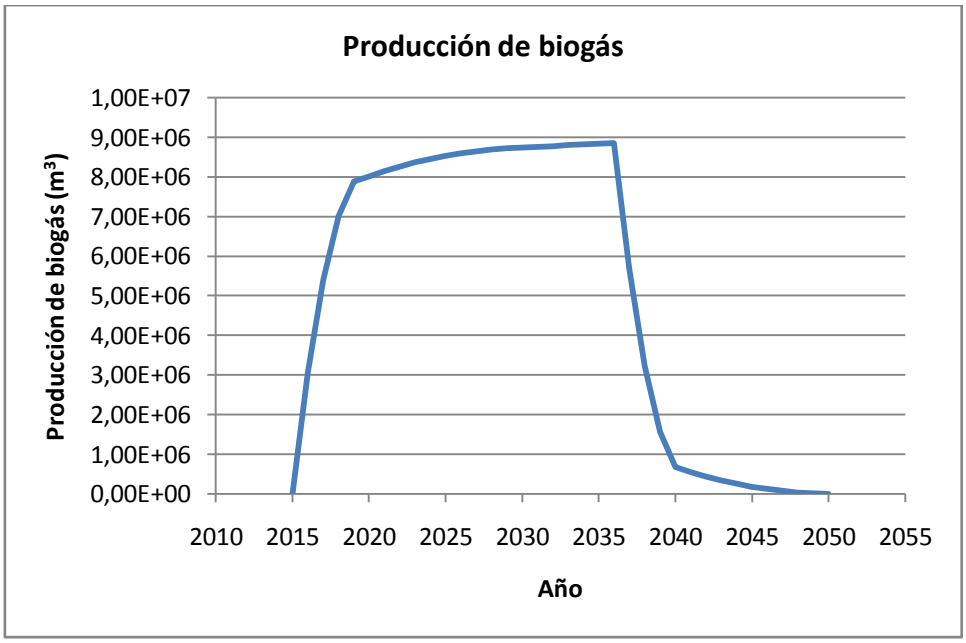


Gráfico 3.- Producción de biogás estimada según modelo estequiométrico

Modelo estequiométrico	
Total biogás (m^3)	1,83E+08
Año de máx. producción	2036
Producción máx. (m^3/año)	8,85+06

Tabla 4.- Resultados del modelo estequimétrico

1.1.3 Modelos de primer orden y multifase

Se asumirá en este caso un valor de L_0=100 m^3/Mg, y una tasa de generación de metano por año k=0,05 $años^{-1}$para los modelos de primer orden con una única fase, ya que estos son los valores recomendados por la EPA.

1.1.3.1 LandGEM

El modelo LandGEM de la EPA, es una herramienta que permite estimar las tasas de emisión de gas con una planilla de cálculo, ingresando los parámetros L_0 y k, así como también la cantidad de residuos depositados en el relleno durante su vida útil.

La ecuación que utiliza el modelo para el cálculo es:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-k\, t_{i,j}}$$

Siendo:

Q_{CH4}: la cantidad de metano anual generada en el año del cálculo (m^3/año);

M_i:toneladas de residuos sólidos dispuestos o proyectados a disponer de la fracción *i* en el año *t*

i: elincremento por año;

j: el 0.1 incremento por año;

n: se calcula como:(año del cálculo) – (año de ingreso del residuo);

t_{ij}: es edad de la j^{esima} fracción de residuos dispuestos (M_i) en el año *i.*

A continuación se presentan los datos de entrada y resultados obtenidos para el caso de estudio.

Datos de Entrada	
Apertura del SDF (año)	2015
Clausura del SDF (año)	2035
Tasa de decaimiento: k ($año^{-1}$)	0,05
Potencial de generación: L_o (m^3/Mg)	100
Concentración NMOC (ppm de hexano)	4.000
Contenido de metano(% en volumen)	50

Tabla 5.- Datos de entrada, LandGEM

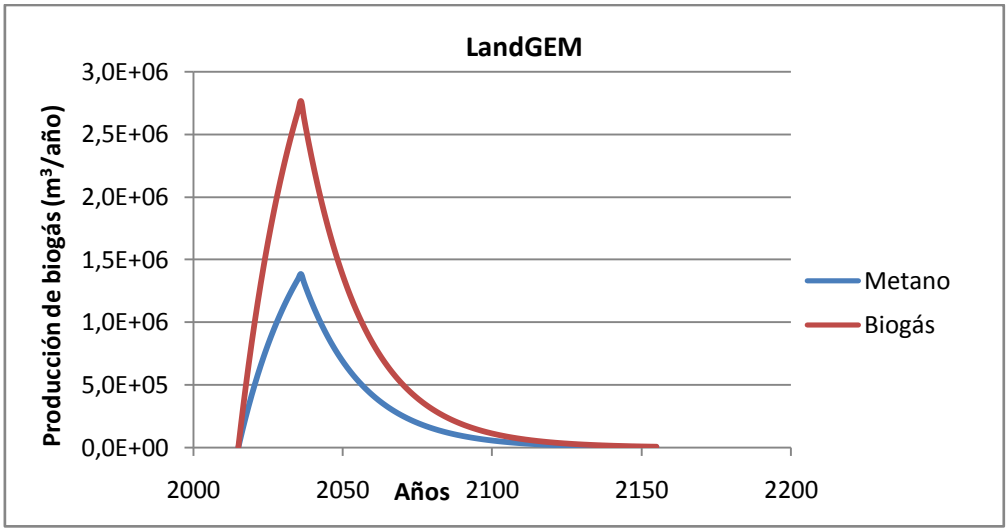


Gráfico 4.-Producción de biogás y metano estimada según LandGEM

Modelo LandGEM	
Total biogás (m^3)	8,89E+07
Año de máx. producción	2036
Producción máx. (m^3/año)	2,77E+06

Tabla 6.- Resultados del modelo LandGEM

1.1.3.2 Modelo de primer orden: General

La ecuación que utiliza el modelo para el cálculo es:

$$G_{CH_{4,n}} = \sum_{t=c}^{n=1} k_i L_0 M_{i,t} e^{-ki(n-t)}$$

- c: año de inicio de la disposición de residuos en la celda de influencia de la red de captación de biogás (c<n)
- k_i: tasa de generación de metano de la fracción *i* de residuos [$año^{-1}$]
- L_0: potencial máximo de generación de metano [m^3/ton]
- $M_{i,t}$: toneladas de residuos sólidos dispuestos o proyectados a disponer de la fracción *i* en el año *t*

Los datos de entrada del modelo son:

Datos de Entrada	
L_0 (m^3/ton)	100
k ($año^{-1}$)	0,05

Tabla 7.- Datos de entrada, modelo General

Aplicando la ecuación propuesta por el modelo General para el caso de estudio, se obtuvieron los siguientes resultados:

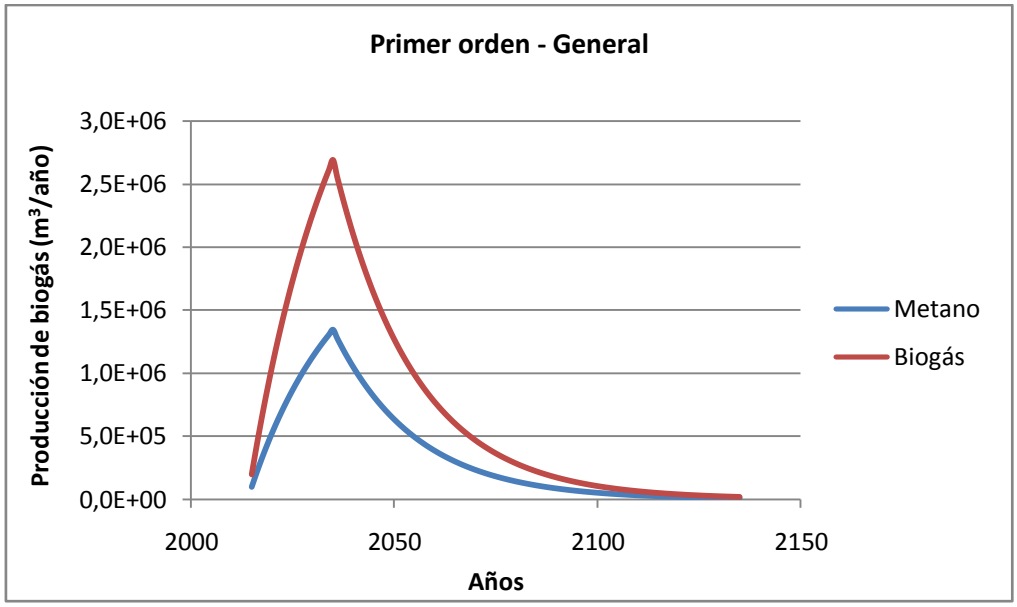


Gráfico 5.-Producción de biogás y metano estimada según modelo General (primer orden)

Modelo General	
Total biogás (m^3)	8,62E+07
Año de máx. producción	2035
Producción máx. (m^3/año)	2,69E+06

Tabla 8.- Resultados del modelo General (primer orden)

1.1.3.3 Modelo Centroamericano

Este modelo estima la generación de biogás con la misma ecuación utilizada por el LandGEM; sin embargo, la principal diferencia es que considera dos valores de k, según si el decaimiento es rápido o lento.

El modelo considera composiciones de residuos fijas (no admite la modificación de las mismas) para los países: Nicaragua, México, Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá. Se seleccionó la composición de Nicaragua ya que era la que presentaba mayor similitud con la del caso en estudio.

También incluye variables propuestas por el modelo IPCC como el factor de corrección para el metano (FCM) que se determina en función de la profundidad del relleno y su forma de operación; en este caso la operación es controlada y se supuso una profundidad de 10 m teniendo en cuenta que ésta es la altura media de las celdas de los SDF de características similares en el país.

En la Tabla 9 se presentan los datos de entrada:

Datos de entrada	
País	Nicaragua
Año de Apertura	2015
Crecimiento estimado de disposición anual (%)	1,002
Precipitación Promedio Anual (mm)	1.100
Profundidad promedio del relleno (m)	10,0
Diseño y operación del lugar	Relleno Sanitario
Contenido de Metano en el Biogás (%)	50
Factor de Corrección de Metano (FCM)	1,0
Constante k, para residuos orgánicos de degradación rápida (años^{-1})	0,18
Constante de k, para residuos orgánicos de degradación lenta(años^{-1})	0,050
Índice de generación final L_0 (m^3/ton):	100,0

Tabla 9.- Datos de entrada, Modelo Centroamericano

Además, se deben ingresar en la hoja de cálculo año a año los datos de toneladas dispuestas en el relleno.

Se obtuvo el siguiente resultado:

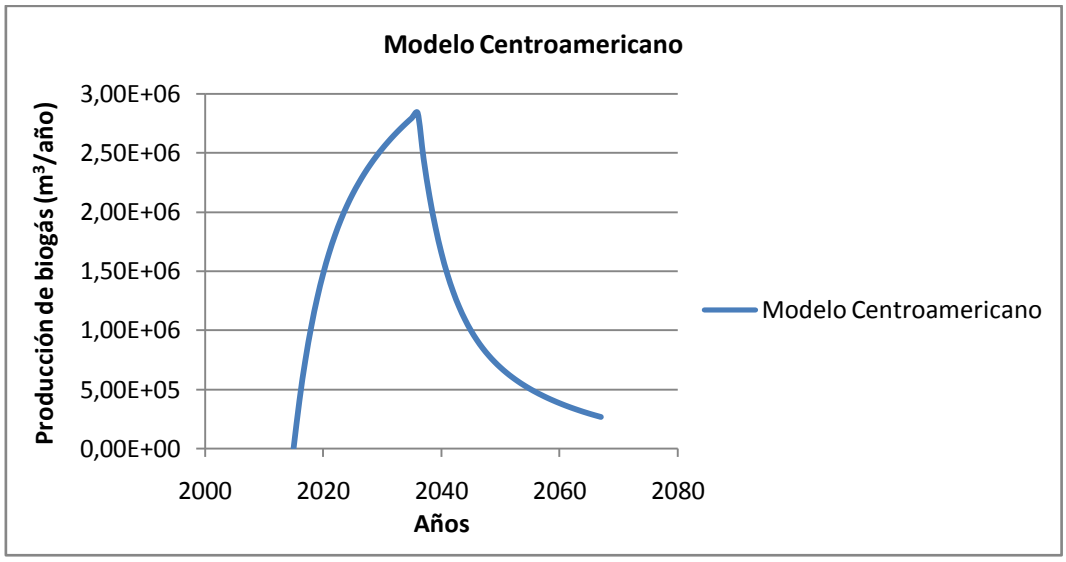


Gráfico 6.-Producción de biogás según modelo centroamericano (dos fases)

Modelo Centroamericano	
Total biogás (m^3)	6,82E+07
Año de máx. producción	2036
Producción máx. (m^3/año)	2,84E+06

Tabla 10.- Resultados del modelo centroamericano (dos fases)

1.1.3.4 Modelo de primer orden: IPCC

El modelo del IPCC es aplicado a través de una planilla de cálculo en Excel. En esta misma planilla se puede calcular la generación de biogás por el modelo de primer orden o el multifase seleccionando las opciones de trabajo *"Bulk waste data only"*o *"Waste by composition"*.

En este caso se seleccionó la opción*"Bulk waste data only"*, por lo que el modelo considerará un único valor representativo de los parámetros DOC (carbono orgánico degradable) y k (tasa de generación de metano). Para el DOC, se tomó el valor recomendado por defecto para RSU.

El factor de corrección para el metano (FCM) es una variable incluida en el modelo que contempla el tipo de relleno en análisis; se consideró que el 100% de los residuos se disponen en el relleno de manera controlada y son degradados anaeróbicamente.

A continuación se presentan los datos de entrada

Datos de entrada	
Carbono orgánico degradable: DOC	0,16
Tasa de decaimiento: k (años^{-1})	0,05
Factor de corrección del metano: FCM	1
Factor de oxidación: OX	0

Tabla 11.- Datos de entrada,

Además de los parámetros anteriormente mencionados, se deben ingresar en la hoja de cálculo año a año los datos de población y tasas de generación.

Se obtuvo el siguiente resultado:

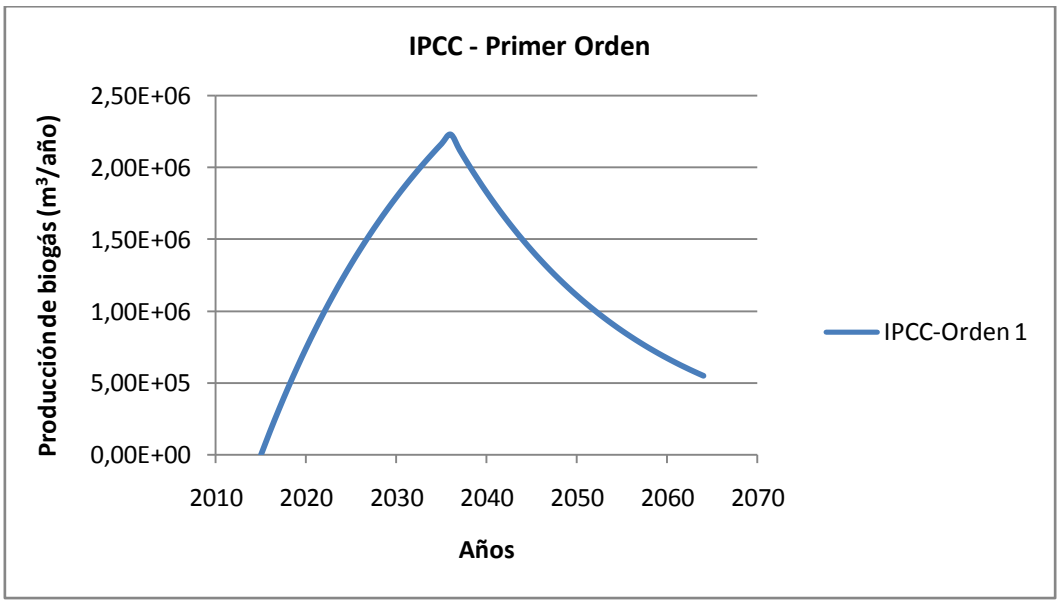


Gráfico 7.-Producción de biogás según modelo IPCC (primer orden)

IPCC Primer orden	
Total biogás (m^3)	6,10E+07
Año de máx. producción	2036
Producción máx. (m^3/año)	2,23E+06

Tabla 12.- Resultados del modelo IPCC (primer orden)

1.1.3.5 Modelo Multifase: IPCC

A diferencia del modelo de primer orden, en este caso se selecciona la opción de trabajo*"Waste by composition"* que permite ingresar la composición de los residuos dispuestos en el relleno y considera para cada tipo de material un valor de DOC y k. Para el cálculo, se consideraron los valores recomendados por defecto por el IPCC.

El factor de corrección para el metano (FCM) fue determinado análogamente al modelo de primer orden IPCC

En la Tabla 13se presentan los datos de entrada:

Datos de entrada		
Tipo Residuo	**Composición(% en peso)**	**DOC**
Comida	42	0,15
Jardín	0	0,2
Papel	15	0,4
Madera	3	0,43
Textil	3	0,24
Pañales	5	0,24
Plásticos y otros inertes	32	

Tabla 13.- Datos de entrada

Además de los parámetros anteriormente mencionados, se deben ingresar en la hoja de cálculo año a año los datos de población y tasas de generación.

Se obtuvo el siguiente resultado:

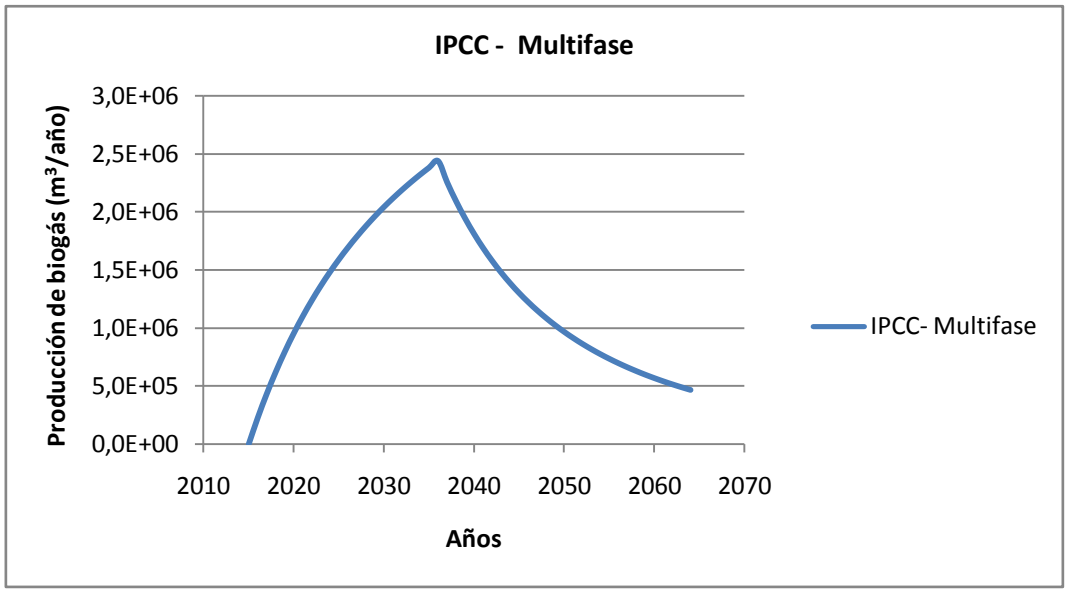


Gráfico 8.-Producción de biogás según modelo IPCC (multifase)

IPCC Multifase	
Total biogás (m^3)	6,32E+07
Año de máx. producción	2036
Producción máx. (m^3/año)	2,44E+06

Tabla 14.- Resultados del modelo IPCC (multifase)

1.1.4 Modelos de orden cero

1.1.4.1 Modelo de orden cero: IPCC

Este método supone que la totalidad del metano se libera durante el año que se produce la disposición de los desechos.

La ecuación utilizada para el cálculo es la siguiente:

$$QCH_4 = \left(MSW_T \cdot MSW_F \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} - R\right) \cdot (1 - OX)$$

Siendo:

QCH_4: Emisiones de metano [Gg/yr]

MSW_T: Metano total generado [Gg/yr]

F: Fracción de CH_4 en el biogás del relleno (el valor por defecto en IPCC es 0.5)

El valor de los parámetros DOC y DOC_F (fracción de DOC asimilada), se tomaron a partir de las recomendaciones del IPCC por defecto para los RSU.

Datos de Entrada[1]	
Fracción de RSU dispuestos en el RSa: MSW_F	1
Factor de corrección del metano: MCF	1
Carbono orgánico degradable: DOC (kgC/kgSW)	0,16
Fracción de carbono orgánico degradable no asimilado: DOC_F	0,77
Cantidad de metano recuperado: R (Gg/año)	0
Factor de oxidación: OX	0

Tabla 15.- Datos de entrada

Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

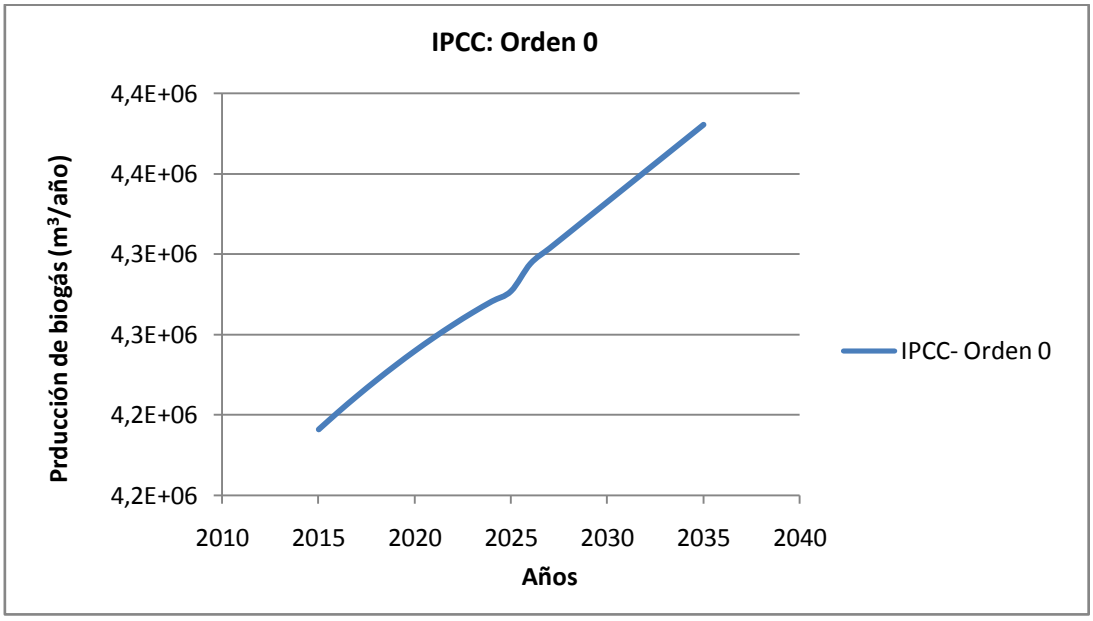


Gráfico 9.-Producción de biogás según modelo IPCC (orden cero)

IPCC: Orden cero	
Total biogás (m^3)	1,08E+08
Año de máx. producción	2035
Producción máx. (m^3/año)	5,26E+06

Tabla 16.- Resultados del modelo IPCC (multifase)

[1] Ver sección 1.5.4, Memoria justificativa

1.1.4.2 Modelo de orden cero: EPA

La formulación de este modelo está basada en la relación empírica entre la cantidad de residuos dispuestos en el relleno y el biogás generado, observada en diferentes proyectos de recuperación de biogás.

Como resultado, se tiene la siguiente expresión:

$$Generacion\ anual\ de\ biogas\ (m^3) = 0{,}0028\ m^3/lb\ x\ 2200\ \ lb/ton\ \cdot Residuos\ (ton)$$

Se obtuvieron los siguientes resultados:

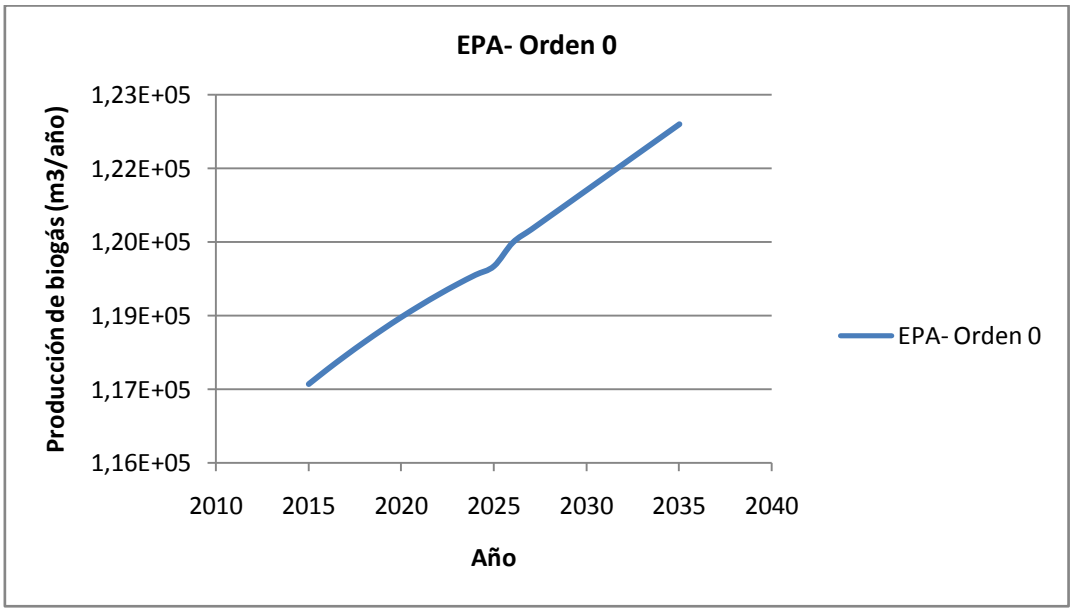


Gráfico 10.-Producción de biogás según modelo EPA (orden cero)

EPA: Orden cero	
Total biogás (m^3)	2,51E+06
Año de máx. producción	2035
Producción máx. (m^3/año)	1,22E+05

Tabla 17.- Resultados del modelo EPA (orden cero)

1.1.4.3 Modelo SWANNA

En este caso el modelo tiene en cuenta el potencial de generación de metano (Lo) y el tiempo de descomposición de los residuos dado por las variables t_0 y t_1.Para aplicar el modelo se consideró un tiempo de descomposición promedio de los residuos de 13 años.

Se calcula el caudal total de biogás generado a partir de la ecuación:

$$Q = \frac{ML_0}{(t_0 - t_1)}$$

Luego supone que la generación de biogás durante la degradación (13 años) de la cantidad de residuos M_i depositada en el año i, es constante.

Finalmente se calcula la cantidad de biogás año a año como la sumatoria del biogás generado asociado a todos los residuos que se encuentren en degradación dicho año.

Datos de entrada	
L_0 (m^3/ton)	100
T (años)	13

Tabla 18.- Datos de entrada

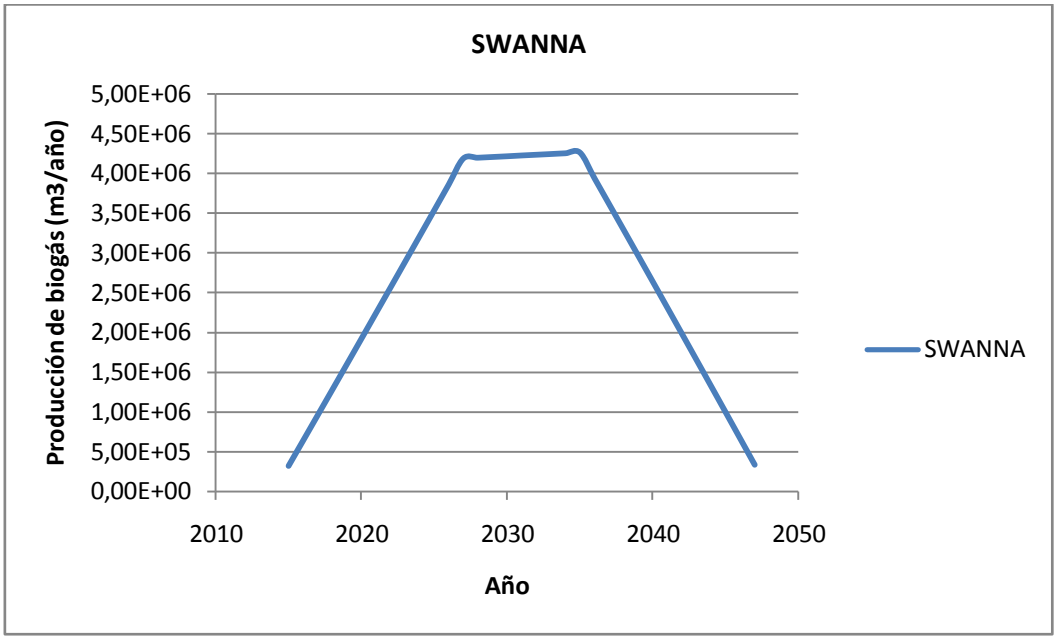


Gráfico 11.-Producción de biogás según modelo SWANNA (orden cero)

SWANNA	
Total biogás (m^3)	8,88E+07
Año de máx. producción	2034-2035
Producción máx. (m^3/año)	4,26E+06

Tabla 19.-Resultados del modelo SWANNA (orden cero)

1.2 Generación de energía a partir del biogás

Como fue explicado en la Sección 3.2 de la Memoria Justificativa, se tomaron seis casos de estudio para analizar la factibilidad económica de generar energía a partir del biogás producido en RSa en funcionamiento a diferentes escalas. Las poblaciones seleccionadas son: 10.000, 50.000, 80.000, 100.000, 120.000 y 150.000 habitantes.

1.2.1 Tasa de crecimiento poblacional

En primer lugar, para cada caso de estudio se debía conocer la tasa de crecimiento poblacional anual. Por lo tanto, para determinarla se utilizó información proveniente de dos fuentes: los datos censales del 2004 y 2011, y las proyecciones poblaciones realizadas por el Instituto Nacional de Estadística (INE). En particular, el INE brinda datos estadísticos de población urbana por departamento, siendo la de menor población la de Flores con 21.181 habitantes, por lo tanto para las localidades con poblaciones menores se calculó la tasa de crecimiento en base a los últimos dos censos.

Se decidió discretizar en rangos poblaciones en función de las poblaciones definidas para los casos de estudio. Debido a que existen gran cantidad de localidades con poblaciones menores a 10.000 y entre 10.000 – 50.000 habitantes, se decidió incorporar tres rangos adicionales así obtener resultados con un mayor grado de detalle.

- < 2.000 habitantes
- 2.000 < habitantes < 5.000
- 5.000 < habitantes < 10.000
- 10.000 < habitantes < 20.000
- 20.000 < habitantes < 50.000
- 50.000 < habitantes < 80.000
- 80.000 < habitantes < 100.000
- 100.000 < habitantes < 120.000
- 120.000 < habitantes < 150.000

De los tres primeros rangos, se seleccionó en promedio 10 localidades para cada uno y se determinó la tasa de crecimiento (o decrecimiento) anual dada entre el 2004 y el 2011. Se calculó el promedio entre las tasas anuales halladas para siete años, entre el 2004 y el 2011, asumiendo que en los próximos años las localidades mantendrían el mismo comportamiento en cuanto el desarrollo poblacional. Luego, se tomó el promedio de las tasas determinadas para cada localidad dentro de cada rango, obteniéndose de esta forma un valor para la tasa de crecimiento poblacional por rango.

Para localidades con población mayor a 10.000 personas se seleccionaron 21 localidades, con una población mínima de 10.630 habitantes en Nueva Helvecia y como máxima 78.900 habitantes en Rivera. Se determinó, siguiendo el proceso descrito anteriormente, la tasa de crecimiento para cada localidad y luego se calculó la tasa para las poblaciones entre 10.000 – 20.000 habitantes, 20.000 – 50.000 habitantes y 50.000 – 80.000 habitantes como el promedio

de las tasas, previamente halladas, de las localidades pertenecientes a cada rango, resultando de esta forma un valor de tasa de crecimiento anual por rango.

Por otro lado, a partir de las proyecciones del INE desde el 2016 al 2025 se tomó el promedio de la tasa de crecimiento anual, obteniéndose una única tasa por localidad. Luego, para los últimos seis rangos definidos (20.000 – 50.000, 50.000 – 80.000, 80.000 – 100.000, 100.000 – 120.000 y 120.000 – 150.000), se determinó la tasa como el promedio de las tasas halladas para las localidades pertenecientes a cada rango, resultando un valor por rango.

A partir de los resultados por ambos métodos, se realizó una tabla resumen con los valores determinados para cada rango. En particular, para las poblaciones entre 20.000 – 50.000 y 50.000 – 80.000 habitantes se halló un valor de tasa de crecimiento por cada método, con lo cual se decidió tomar el promedio entre ambos resultados.

En la tabla 19se presentan los valores obtenidos para cada rango.

Población	Tasa crecimiento anual
2.000	0,993
5.000	0,998
10.000	1,001
20.000	1,005
50.000	1,001
80.000	1,006
100.000	1,007
120.000	1,008
150.000	1,013

Tabla 20.- Tasa de crecimiento anual para distintas poblaciones

En el Gráfico 12 se puede observar el comportamiento para distintas poblaciones. En particular para las localidades con poblaciones menores a 10.000 la tasa es decreciente,mientras que en general a mayor población mayor es la tasa de crecimiento.

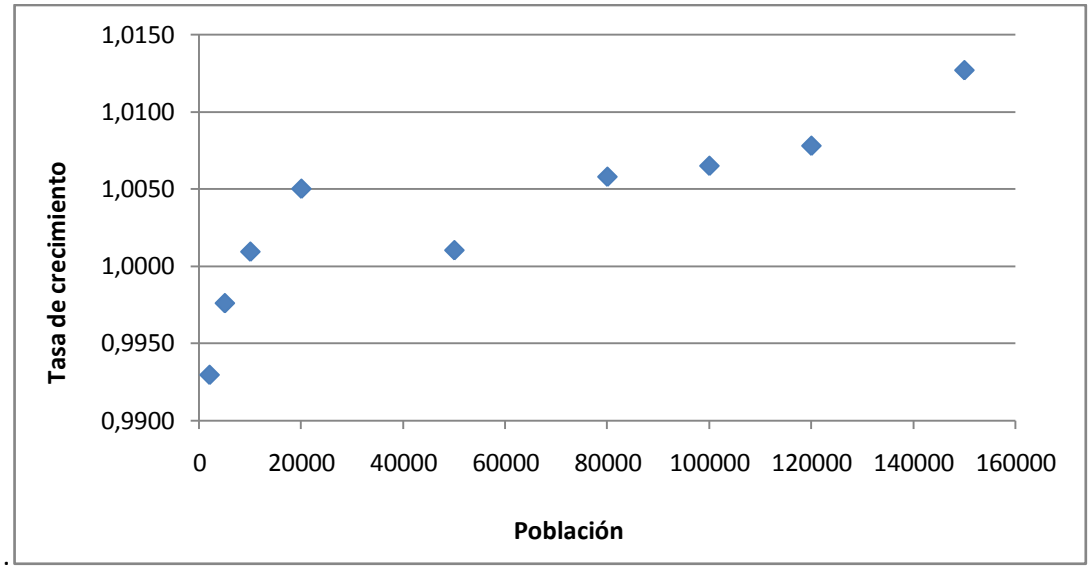


Gráfico 12.-Tasa de crecimiento poblacional para distintas poblaciones

1.2.2 Tasa de generación de residuos

Para determinar la tasa de generación de residuos por habitante se utilizó información de las toneladas depositados en los SDF en las localidades del interior del país y la población servida[2] actualizada al 2012.

Se realizó la misma discretización de la población que para el cálculo de la tasa de crecimiento anual de la población. En particular se analizaron las tasas de generación de cada rango, eliminándose valores que resultaran anormales, como por ejemplo tasas de generación de residuos mayores a 1,8 para localidades con poblaciones menores a los 1.000 habitantes.

En cada rango definido se determinó la tasa de generación para los límites del rango. Es decir, para el primer rango se halló la tasa de generación para una población de 2.000 habitantes, mientras que para el segundo rango se determinó la tasa para poblaciones de 2.000 y 5.000 habitantes, solapándose los extremos de los rangos. Luego se calculó el promedio obteniéndose un único valor para cada población definida.

En particular, para poblaciones mayores a 10.000 habitantes se ajustaron las tasas calculadas para cada localidad a una recta y se determinó la tasa de generación para 10.000, 20.000, 50.000, 80.000, 100.000, 120.000 y 150.000 habitantes.

En la Tabla 21se presentan los valores obtenidos para cada población.

[2] Fuente: Información de base para el diseño de un Plan Estratégico de Residuos Sólidos, Tomo 1: Línea de Base. CSI Ingenierios, Estudio Pittamiglio, OPP. Agosto 2011.

Población	Tasa generación (kg/día/hab)
2.000	0,83
5.000	0,83
10.000	0,70
20.000	0,70
50.000	0,73
80.000	0,76
100.000	0,78
120.000	0,80
150.000	0,83

Tabla 21.- Tasa de generación de residuos para distintas poblaciones

Los resultados obtenidos reflejan un crecimiento lineal a partir de poblaciones mayores a 10.000 habitantes. Para realizar el ajuste se descartaron los valores para 2.000 y 5.000 habitantes, ya que presentan un comportamiento diferente que el resto de las poblaciones. Además, si bien la fuente empleada fue la misma en todos los casos, por tratarse de localidades pequeñas y con poca información es de sospechar que los valores de toneladas dispuestas en los SDF incluyen otros tipos de residuos además de RSU, ya que muchas veces la tasa de generación para localidades menores a 5.000 habitantes resultaba mayor a 1,5 kg/hab/día. Por lo tanto, se concluyó que los resultados obtenidos para dichas poblaciones no son representativos.

En el Gráfico 13 se presentan los resultados.

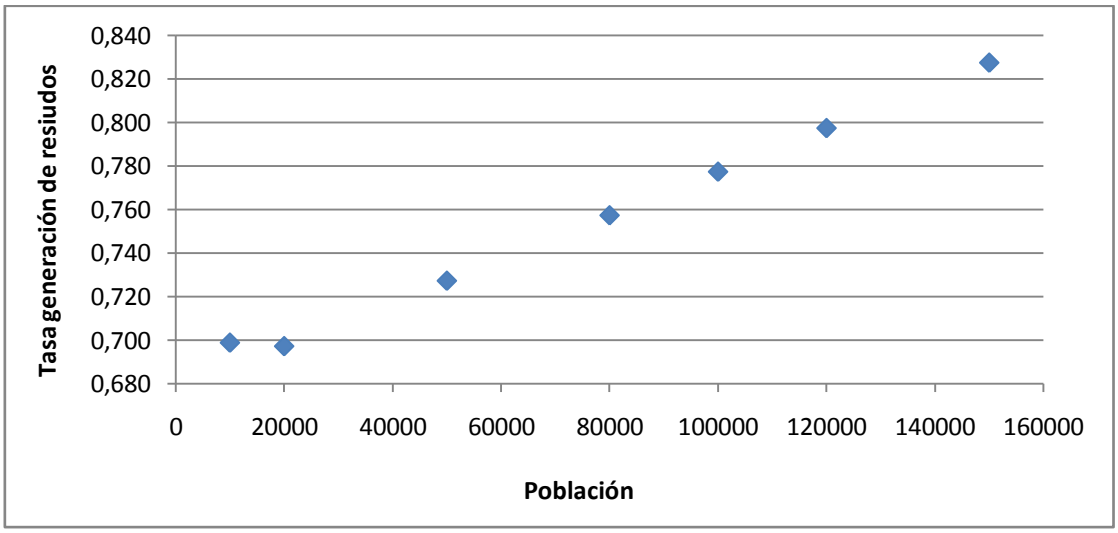


Gráfico 13.-Tasa de generación de residuos para distintas escalas de poblaciones

1.2.3 Calculo del Poder Calorífico Inferior (PCI) del Biogás

El PCI es la cantidad total de calor desprendido en la combustión de una unidad de volumen de combustible sin considerar la energía asociada a la condensación del vapor de agua contenido en los gases de combustión.

Para determinar el PCI del biogás es necesario conocer la composición, que varía según la edad del RSa y las características de los residuos depositados, entre otros aspectos. En la Tabla 22se presentan las proporciones, en volumen seco, típicos de los gases que lo componen.

Componente		% Volumen seco
Amoníaco	NH_3	0,1 - 1
Dióxido de Carbono	CO_2	40 - 60
Monóxido de Carbono	CO	0 - 0,2
Hidrógeno	H_2	0 - 0,2
Metano	CH_4	45 - 60
Nitrógeno	N_2	2 - 5
Oxigeno	O_2	0,1 - 1

Tabla 22.- Componentes del biogás

A partir de los poderes caloríficos de los diferentes compuestos a 25 °C y 1 atmósfera, se calcula el Poder Calorífico del biogás, como la suma de cada uno de los componentes del biogás. En la Tabla 23se presentan los resultados obtenidos.

Compuesto	Qpi (KJ/kg)	Peso específico (kg/m^3)	% Volumen seco promedio	KJ/m^3	KJ/m^3 biogás	KWh/m^3
Amoníaco	18.599,0	0,77	0,55	14.339,8	78,9	2,19E-02
Dióxido de Carbono	0	1,98	45,2	0	0	0
Monóxido de Carbono	10.109,9	1,25	0,10	12.637,4	12,6	3,51E-03
Hidrógeno	240.081,8	0,09	0,10	21.367,3	21,4	5,94E-03
Metano	50.059,4	0,72	50,0	35.882,5	17.941,3	4,98
Nitrógeno	0	1,25	3,50	0	0	0
Oxígeno	0	1,43	0,55	0	0	0
			Total Biogás		**18054,1**	**5,02**

Tabla 23.- Cálculo del PCI a partir de los componentes del biogás

1.3 Análisis de viabilidad de generación de energía a partir del biogás de un Relleno Sanitario en funcionamiento

Con el objetivo de analizar la factibilidad económica de incorporar una planta de generación de energía a partir del biogás producido en un RSa en funcionamiento, se considerarán los costos asociados a la instalación de la planta (sistema de recuperación de biogás, sistema de generación de energía, conexión a la red, entre otros), y los costos de operación y mantenimiento.

No se tendrán en cuenta los costos relacionados con la instalación del relleno y su operación, ya que se asume que el RSa ya existe y se encuentra en funcionamiento.

Para realizar el análisis se consideraron dos escenarios para las diferentes escalas en estudio en función de los años de funcionamiento de la planta de generación de energía y la forma de explotación del RSa:

- Explotación mediante módulos de 1 año y 26 años de funcionamiento de la planta de generación de energía.
- Explotación mediante módulos de 5 años y 21 años de funcionamiento de la planta de generación de energía.

1.3.1 Generación de energía

1.3.1.1 Producción de biogás

Para cada caso de estudio planteado se determinó la cantidad de biogás generado en función de la cantidad de residuos dispuestos anualmente, lo cual depende directamente de la población y de la tasa de generación de residuos asignada a dicha población.

El biogás producido en cada uno de los RSa en estudio fue calculado a partir de la siguiente ecuación, según lo desarrollado en el Capitulo 5.2.2, Memoria Justificativa.

$$G_{CH_{4,n}} = \left[F_l \cdot \sum_{t=c}^{n-1} k_i^l L_0 M_{i,t} e^{-k_i^l (n-t)} + F_r \cdot \sum_{t=c}^{n-1} k_i^r L_0 M_{i,t} e^{-k_i^r (n-t)}\right] \cdot f_c$$

Siendo:

Potencial de generación de metano: L_0 = 94 m^3/ton

Tasa de generación de metano para la fracción lentamente degradable: k^l = 0,056$año^{-1}$

Tasa de generación de metano para la fracción rápidamente degradable: k^r = 0,28$año^{-1}$

Porcentaje de residuos lentamente degradable: F_l = 9 %

Porcentaje de residuos rápidamente degradable: F_r = 56 %

Factor de corrección: f_c = 0,56

A partir de la ecuación anterior se determina para cada año la cantidad de metano producido por los residuos depositados, suponiendo que el relleno tiene una vida útil de 20 años y luego es clausurado. Luego se determinó el biogás producido, asumiendo que el biogás está compuesto en promedio por un 50 % de metano.

En la Tabla 24se presentan algunos valores de biogás obtenidos para cada caso de estudio.

Población	Promedio (m^3/año)	Máximo (m^3/año)	Total durante 40 años (m^3)
10.000	2,69E+04	1,48E+05	3,16E+06
50.000	1,40E+05	7,73E+05	1,64E+07
80.000	2,45E+05	1,39E+06	2,88E+07
100.000	3,17E+05	1,81E+06	3,72E+07
120.000	3,95E+05	2,27E+06	4,64E+07
150.000	5,39E+05	3,20E+06	6,32E+07

Tabla 24.- Producción de biogás para distintas poblaciones

Luego se define la producción efectivamente captada de biogás en función del rendimiento del sistema de recuperación de biogás, considerando una eficiencia de recuperación 70% (μ_{rec}).

$$G_{biog\ ás,captado} = \mu_{rec.} \cdot G_{biog\ ás,generado}$$

1.3.1.2 Energía generada a partir del biogás

Para cada una de las tecnologías planteadas en el análisis: motor de combustión interna, micro-turbinas y ciclo combinado se determinó la energía generada en función del rendimiento de cada una de ellas, presentados en la sección 2.6.1. de la Memoria Justificativa.

La potencia eléctrica generada, por unidad de generación de energía eléctrica constituida por un convertidor de biogás en energía mecánica y un generador eléctrico, se puede calcular como:

$$P_{BG}[kW] = PCI_{BG}\left[\frac{kWh}{m^3}\right] \cdot Q\left[\frac{m^3}{h}\right] \cdot \eta$$

Siendo

P_{BG}: Potencia generada a partir del biogás (kW)

Q: Caudal de biogás generado (m^3/h)

η: Rendimiento de la tecnología de generación de energía eléctrica utilizada

PCI_{BG}: Poder calorífico inferior del biogás (= 5,02 kWh/m^3, calculado en la sección 1.2.3)

	Potencia máxima a instalar (kW)		
Población	**Motor de combustión interna**	**Ciclo combinado**	**Micro-turbinas**
10.000	17,53	24,10	13,15
50.000	91,29	125,52	68,46
80.000	163,81	225,24	122,86
100.000	212,47	292,15	159,35
120.000	266,95	367,06	200,21
150.000	373,46	513,51	280,10

Tabla 25.- Máxima potencia a instalar segúntecnología empleada

Luego, a partir de la potencial anual determinada para cada motor se calculó la energía eléctrica anual generada por cada tecnología como:

$$E_{BG}[kWh] = P_{BG}[kW] \cdot 365\left[\frac{días}{año}\right] \cdot 24\left[\frac{horas}{dia}\right]$$

En la Tabla 26se presentan los resultados de energía eléctrica obtenidos para cada caso de estudio.

	Energía eléctrica anual máxima (kWh)		
Población	**Motor de combustión interna**	**Ciclo combinado**	**Micro-turbinas**
10.000	153.536	211.112	115.152
50.000	799.667	1.099.542	599.750
80.000	1.435.012	1.973.141	1.076.259
100.000	1.861.235	2.559.198	1.395.926
120.000	2.338.484	3.215.415	1.753.863
150.000	3.271.519	4.498.338	2.453.639

Tabla 26.- Máxima energía eléctricaanual según tecnología empleada

1.3.2 Costos de inversión y operación y mantenimiento

Las fuentes consultadas y la selección de los costos de inversión y operación y mantenimiento, se encuentran detalladas en la Sección 2.6.2.

Los costos de inversión considerados para los diferentes componentes del sistema se detallan a continuación:

Componente	Costo	
Sistema de recolección	US$/há	40.000
Sistema de bombeo	US$/$m^3$/h biogás	137,5
Antorcha	US$/$m^3$/h biogás	60
Conexión a la red	US$/kW	36
Motor de combustión interna	US$/kW	1.100
Micro-turbina	US$/kW	2.500

Tabla 27.- Costos asociados a la inversión de la planta de generación de energía

La operación y mantenimiento se considero como el 11 % de la inversión anualmente.

Para cada caso de estudio se determinaron las capacidades de los equipos y las etapas de funcionamiento, de manera tal que no se supere la vida útil de los motores, se maximice la utilización de los mismos y se minimicen los costos de inversión.

Para cada etapa se calculó la utilización de los motores, como:

$$Utilización = \frac{\sum P_i}{D \cdot P_{eq}}$$

Siendo:

P_i: potencia generada en el año i

D: duración de la etapa

P_{eq}: potencia del equipo

Los costos anuales de operación y mantenimiento de una planta de biogás con la extracción y un motor de combustión interna o micro-turbina están entre 10 - 12 % de los costos de inversión. En este caso se tomo como valor el 11 % de la inversión en cada año.

1.3.3 Análisis financiero

En función de los egresos por inversión, operación y mantenimiento de la planta de generación de energía y los ingresos por venta de la misma se realiza un análisis financiero para cada caso de estudio.

Se determinó el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

$$VAN\ anual\ = \frac{Flujo\ de\ fondo\ (FF)}{(1 + t_d)^n}$$

$$VAN\ total\ = \sum_{i=1}^{n} VAN\ anual$$

$$FFcon\ financiación\ priopia = [Ingresos] - [Egresos]$$

Siendo:

Tasa de descuento: t_d = 10 %

n: año de estudio – año de inicio del proyecto

Dentro de los ingresos está considerada la venta de energía la cual se calcula como la energía eléctrica generada en dicho año por el precio de venta propuesto.
Dentro de los costos, se consideran las inversiones, la amortización de activos y la operación y mantenimiento.
El costo de las inversiones se incorpora al flujo el año anterior a la realización de la misma. Por otro lado las inversiones sufren una depreciación de activos fijos, que se admite como concepto de costo. Es un costo que no se le paga a nadie, pero la inversión se desvaloriza por cada hora de uso, ese costo debe estar incorporado al producto.

$$Amortización = \frac{Valor\ de\ compra - Valor\ residual}{Vida\ util}$$

1.3.3.1 Préstamo

Para determinar el flujo de fondo con financiación mixta se considera un préstamo de parte del banco del 70 % de la inversión inicial. El préstamo será devuelto con un año de gracia, en 10 años con una tasa de interés de 7 %.

La cuota del banco tiene dos componentes internos: intereses y amortización del crédito. El interés del préstamo se aplica sobre el saldo impago y se calcula como:

$$Interés\ prestamo = Saldo\ impago \cdot t_{inter\ és}$$

La amortización del crédito es básicamente, devolver al banco el dinero que fue prestado, y se calcula como:

$$Amortización\ credito = Cuota\ banco - Interés\ prestamo$$

Entonces, el flujo de fondo con financiación mixta se calcula el primer año como el flujo de fondo (ingresos – egresos) más el préstamo obtenido. Para los diez años siguientes se calcula como el flujo de fondo más la cuota de pagoanual al banco. Para el resto de los años el flujo de fondo con financiación propia y mixta coinciden. En las ecuaciones a continuación se presentan los cálculos realizados.

$$FF\ financiación\ mixta_{Año\ inversi\ ón-1} = FF + Préstamo$$

$$FF\ financiación\ mixta\ _{Años\ con\ pago\ de\ la\ cuota} = FF - Cuota\ banco$$

1.3.3.2 Impuesto a la Renta de Actividades Económicas

Además, se consideró el Impuesto a la Renta de las Actividades Económicas (IRAE), que se calcula como el 25 % de las utilidades. Como se detalla en la Memoria Justificativa, sección 2.6.3.4, se consideró un descuento del IRAE, en función de la evaluación de los proyectos de la COMAP, del 56 % sobre la inversión inicial.

En particular, para los años en los cuales la utilidad es menor a cero, es decir que las ganancias por venta de energía son menores a los costos de operación y mantenimiento, el IRAE es cero. La utilidad antes de impuestos, sobre la que se aplica el IRAE, se calcula como:

$$Utilidad = Venta\ energía - Amortización\ de\ activos - OyM - Interés\ prestamo$$

Por otro lado, el pago mínimo anual de IRAE es del 40 % del impuesto, pudiendo exonerar el restante 60 % durante un plazo de 10 años y hasta descontar la exoneración otorgada (56 % de la inversión). Por lo tanto, el impuesto con exoneración por COMAP corresponde al 40 % del IRAE.

$$FF\ financiación\ mixta\ con\ IRAE = FF\ financiación\ mixta - IRAE_{con\ exoneraci\ ón\ COMAP}$$

De esta forma se determinó el flujo de fondo con financiación propia y financiación mixta con IRAE y para ambos se calculó el Valor Neto Actual y la Tasa de Interna de Retorno.

1.3.3.3 Precio de venta de la energía

Se asumió inicialmente un precio de venta de energía a UTE generada a partir de biomasa de 125 US$/MWh, con el fin de evaluar la factibilidad financiera del proyecto. Luego, se determinó el precio medio de venta de energía a UTE a lo largo de la vida del proyecto de forma que la VAN sea nula, para ambos casos descritos (con IRAE y sin IRAE).

1.3.3.4 Escenario 1: Explotación mediante módulos de 1 año y 26 años de funcionamiento de la planta de generación de energía.

En este caso se construyen módulos de un año de vida útil, por lo tanto se capta el biogás a partir del segundo año de funcionamiento del relleno. Por otro lado, la planta de generación de energía se encuentra en funcionamiento durante 26 años, es decir, continúa funcionando 6 años más luego de clausurado el relleno.

Inversión

El costo de inversión asociado al sistema de bombeo y a la antorcha para quema del biogás, se calculó a partir del máximo caudal de biogás generado en los años de funcionamiento de la planta de energía. Por otro lado, el costo de conexión a la red, fue determinado a partir de la máxima potencia producida por el motor seleccionado de mayor capacidad.

La selección de los motores se realizó considerando los criterios mencionados anteriormente, ver Sección 1.3.2. Se asumió una vida útil de cada motor de aproximadamente 15 años, luego de finalizada una etapa se realiza una reinversión para la compra de un nuevo motor. Debido a esto, se definieron dos etapas de inversión de motores de 12 y 13 años.

En la Tabla 28 se resumen los costos de inversión para las diferentes escalas:

	Inversión (US$)					
	P=10.000	P=50.000	P=80.000	P=100.000	P=120.000	P=150.000
Obras civiles, conexión a la red	1.080	2.880	6.480	8.280	10.440	14.400
Sistemas de bombeo	1.809	9.425	16.980	22.036	27.715	38.922
Sistema de recolección	77.233	321.631	468.696	519.122	503.801	618.225
Equipos 1era etapa	75.000	175.000	176.000	220.000	275.000	374.000
Equipos 2da etapa	75.000	200.000	198.000	253.000	391.000	440.000
Antorcha	790	4.113	7.410	9.616	12.094	13.984
TOTAL	230.912	713.049	873.566	1.032.053	1.148.050	1.503.531

Tabla 28.- Costos inversión, módulos 1 año

La inversión en los pozos de recolección depende de las hectáreas anuales a ser perforadas, las cuales se calcularon en función de la cantidad de residuos que ingresan en al RSa en el año, asumiendo una densidad de compactación de 700 m^3/kg. Luego, para calcular el área de

disposición de residuos se supuso una altura útil total del relleno para cada escala y se consideró a modo de simplificación una geometría rectangular en corte de los módulos.

En la Tabla 29 se presentan las profundidades supuestas para cada una de las escalas en estudio.

	P=10.000	P=50.000	P=80.000	P=100.000	P=120.000	P=150.000
Altura útil (m)	4	6	8	10	12	14

Tabla 29.- Altura útil de los módulos para cada escala

En la Tabla 30 se detallan las características de los equipos de generación de energía seleccionados para ser empleados en cada etapa.

	Etapa	Duración (años)	Equipo	Motor (kW)	Utilización
P=10.000	1	12	Micro-turbina	30	30%
	2	13		30	39%
P=50.000	1	12	Micro-turbina	70	72%
	2	13		80	77%
P=80.000	1	13	Combustión interna	160	72%
	2	13		180	81%
P=100.000	1	12	Combustión interna	200	74%
	2	13		230	82%
P=120.000	1	12	Combustión interna	250	73%
	2	13		290	81%
P=150.000	1	12	Combustión interna	340	71%
	2	13		400	82%

Tabla 30.- Capacidad y utilización equipos, módulos 1 año

Operación y mantenimiento

La operación y mantenimiento del sistema de bombeo, conexión a la red y antorcha se realiza anualmente, con un costo anual del 11 % de la inversión inicial.

En cuanto a los equipos de energía el costo anual de operación y mantenimiento fue determinado como el 11 % del precio de compra del mismo. Los equipos de generación de energía poseen una vida útil, luego de la cual es descartado y se adquiere uno nuevo. Por ello el costo de OyM anual de cada motor varía en función de la etapa en la que nos encontremos analizando.

Por otro lado, todos los años se construyen pozos de captación nuevos, los cuales deben ser operados y mantenidos, así como también los realizados años anteriores. Con lo cual, el costo de operación y mantenimiento del sistema de recolección en determinado año se cálculo como el 11 % de la inversión realizada en dicho año más el 11 % de las inversiones anuales realizadas los años anteriores. Luego debido a que el RSa tiene una vida útil de 20 años y la planta de generación de energía continúa funcionando durante 6 años más, el sistema de recolección continúa siendo operado y mantenido a un costo igual al 11 % de la inversión total realizada para dicho sistema en los 20 años iniciales.

Los costos anuales de OyM totales se determinaron como la suma de cada uno de los mencionados en los párrafos anteriores.

Análisis financiero

Al igual que en el escenario anterior, se procede según lo expuesto en la Sección 1.3.3

En la Tabla 31 se presenta para cada caso de estudio el préstamo otorgado por el banco en el año de inicio del emprendimiento y la cuota de pago anual por dicho préstamo.

Población	Préstamo (US$)	Cuota de pago al banco (US$/año)
10.000	53.456	8.205
50.000	134.141	20.589
80.000	147.998	22.716
100.000	183.816	28.213
120.000	225.593	34.626
150.000	329.126	46.860

Tabla 31.- Préstamo del banco y cuota de devolución al banco, módulos 1 año

Los resultados obtenidos en este caso del análisis financiero fueron los siguientes:

	Población	VAN (US$)	TIR	Precio medio venta energía en US$ (VAN=0)
Micro-turbina	10.000	-195.264	-	379
	50.000	-346.101	-	211
Motor de Combustión Interna	80.000	122.278	15%	112
	100.000	257.642	18%	103
	120.000	451.308	20%	94
	150.000	645.516	21%	92

Tabla 32.- Resumen análisis financiero- Financiación propia sin IRAE, módulos 1 año

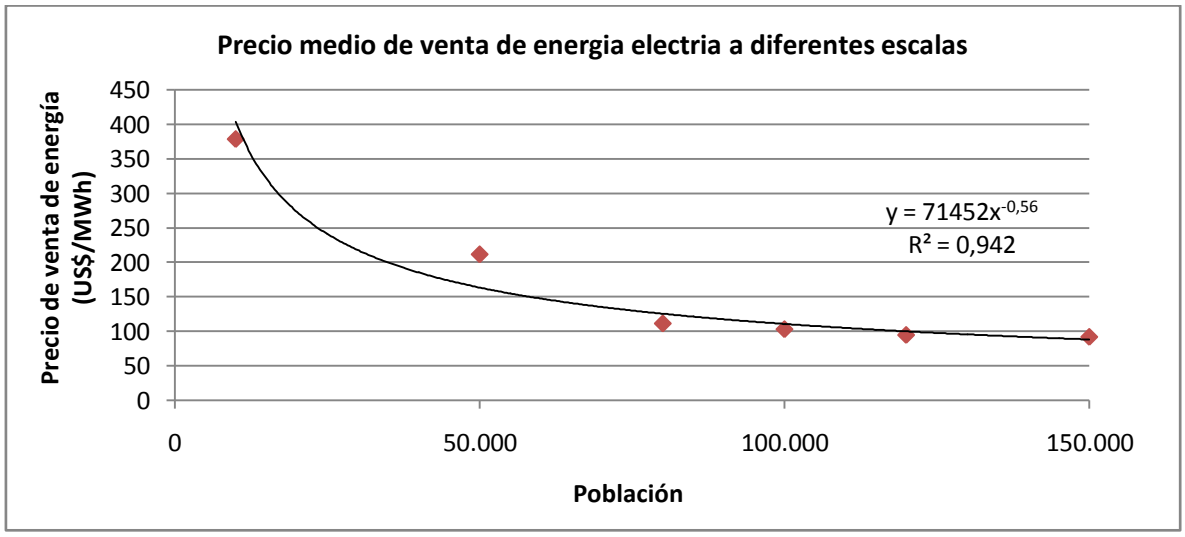


Gráfico 14.-Precio medio de venta energía eléctrica (VAN=0), financiación propia sin IRAE, módulos 1 año

	Población	VAN (US$)	TIR	Precio medio venta energía en US$ (VAN=0)
Micro-turbina	10.000	-188.052	-	387
	50.000	-344.338	-	217
Motor de Combustión Interna	80.000	85.679	16 %	115
	100.000	204.330	21 %	106
	120.000	377.723	25 %	97
	150.000	544.838	25 %	94

Tabla 33.- Resumen análisis financiero- Financiación mixta con IRAE, módulos 1 año

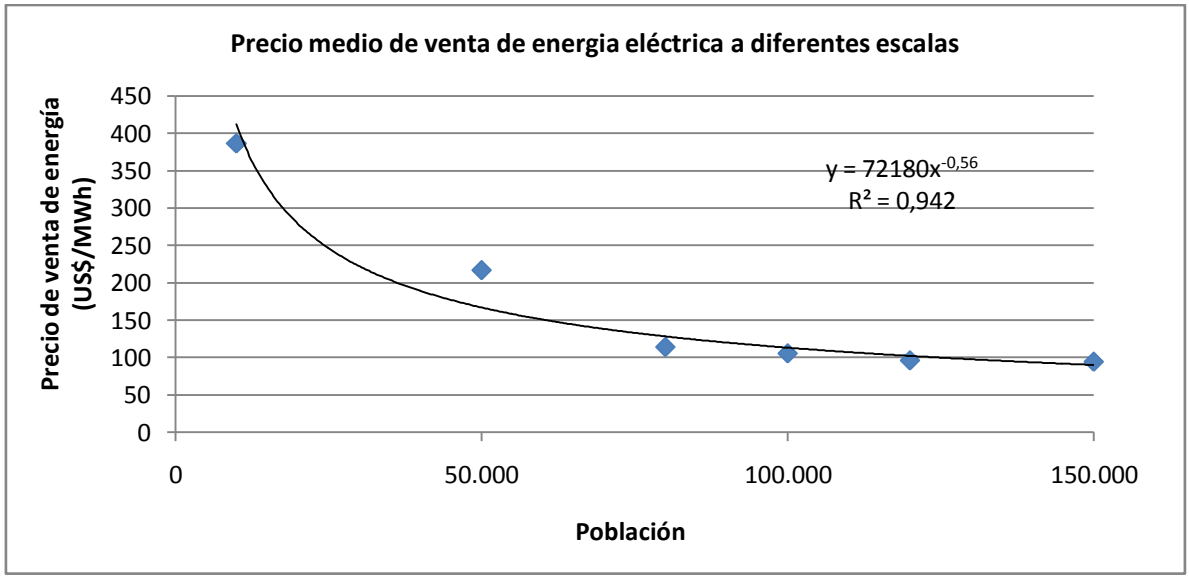


Gráfico 15.- Precio medio de venta energía eléctrica (VAN=0), financiación mixta con IRAE, escenario 2

1.3.3.5 Escenario 2: Explotación mediante módulos de 5 años y 21 años de funcionamiento de la planta de generación de energía.

En este escenario los módulos tienen una vida útil de 5 años, por lo tanto en total son 4 módulos, y se comienza a captar el biogás a partir del sexto año de funcionamiento, es decir, luego de cerrado el primer módulo y continúa en funcionamiento hasta el 2040 (seis años luego de clausurado el relleno).

Por otro lado, este escenario es más desfavorable desde el punto de vista de la captación y generación de energía, ver Sección 2.6.4 de la Memoria Justificativa. Por lo tanto, se optó por analizar únicamente las escalas mayores a 80.000 habitantes, ya que las escalas menores no fueron económicamente viables en el escenario 2 y por lo tanto tampoco lo serán en este caso.

Inversión

Al igual que en los escenarios planteados anteriormente, el sistema de bombeo y la antorcha para quema de biogás se calculan a partir del máximo caudal de biogás generado durante los años de funcionamiento. El costo de conexión a la red se determina en función de la potencia máxima de los motores seleccionados.

Para la selección de los equipos de energía se consideraron dos etapas de 12 y 13 años de funcionamiento.

La inversión en los pozos de recolección en este caso se realiza cada 5 años, debido a que se puede comenzar a captar el biogás una vez que los módulos se encuentren cerrados.
Para calcular las hectáreas a cubrir con los pozos de recolección, se consideraron las siguientes hipótesis con el fin de simplificar los cálculos,

- Cada módulo está conformado por 5 niveles de igual altura $h_{nivel} = H_{modulo}\ /5$.
- Cada nivel es completado con los residuos que ingresan al RSa en un año.
- Geometría de los niveles rectangular en corte

Las hectáreas a ser perforadas son las correspondientes al último nivel de cada módulo, calculadas según:

$$Area\ [há] = \frac{M_i\left[\frac{kg}{año}\right]}{700\left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot H_{modulo}\ [m]/5 \cdot 10000\left[\frac{m^2}{há}\right]}$$

Siendo M_i la cantidad de residuos dispuestos en el RSa en el último nivel.

Las alturas útiles totales de los módulos consideradas para cada una de las escalas fueron las siguientes:

	P=80.000	P=100.000	P=120.000	P=150.000
Altura útil (m)	8	10	12	14

Tabla 34.- Altura útil de los módulos 5 años para cada escala

En la Tabla 35se resumen los costos de inversión al día de hoy (sin considerar inflación ni tasa de descuento de los años futuros) para las diferentes escalas:

	Inversión (US$)			
	P=80.000	P=100.000	P=120.000	P=150.000
Obras civiles, conexión a la red	6.480	8.280	10.080	14.400
Sistemas de bombeo	16.817	21.810	27.398	38.301
Sistema de recolección	333.797	344.937	358.425	417.802
Equipos 1era etapa	165.000	220.000	264.000	352.000
Equipos 2da etapa	198.000	253.000	308.000	440.000
Antorcha	7.338	9.517	11.955	16.713
TOTAL	727.432	857.544	979.858	1.279.216

Tabla 35.- Costos inversión, módulos 5 años

Razonando análogamente a los escenarios anteriores, se definen las capacidades de los equipos, en este caso para dos etapas de 10 y 11 años de funcionamiento.

	Etapa	Duración (años)	Equipo	Motor (kW)	Utilización
P=80.000	1	10	Combustión interna	150	55%
	2	11		180	58%
P=100.000	1	10	Combustión interna	200	53%
	2	11		230	58%
P=120.000	1	10	Combustión interna	240	55%
	2	11		280	60%
P=150.000	1	10	Combustión interna	320	55%
	2	11		400	58%

Tabla 36.- Capacidades y utilización, módulos 5 años, módulos 5 años

Para los costos de operación y mantenimiento del sistema se razona análogamente al escenario anterior, la diferencia que se tiene es que la inversión de los pozos se realiza cada cinco años.

Análisis financiero

En la Tabla 37 se presenta para cada caso de estudio el préstamo otorgado por el banco en este caso en el año 2020 (cuando comienza a realizarse la captación) y la cuota de pago anual por dicho préstamo.

Población	Préstamo (US$)	Cuota de pago al banco (US$/año)
80.000	192.850	27.458
100.000	239.188	34.055
120.000	258.362	39.655
150.000	335.184	51.446

Tabla 37.- Préstamo del banco y cuota de devolución al banco, módulos 5 años

Los resultados del análisis financiero obtenidos en este caso fueron los siguientes:

	Población	VAN (US$)	TIR	Precio medio venta energía en US$ (VAN=0)
Motor de Combustión Interna	80.000	-65.055	-	139
	100.000	-17.896	8%	128
	120.000	50.454	13%	118
	150.000	110.355	15%	114

Tabla 38.- Resultados análisis financiero- Financiación propia sin IRAE, módulos 5 años

	Población	VAN (US$)	TIR	Precio medio venta energía en US$ (VAN=0)
Motor de Combustión Interna	80.000	-70.652	-	141
	100.000	-29.149	4%	130
	120.000	31.215	16%	120
	150.000	80.974	21%	116

Tabla 39.- Resultados análisis financiero-Financiación mixta con IRAE, módulos 5 años

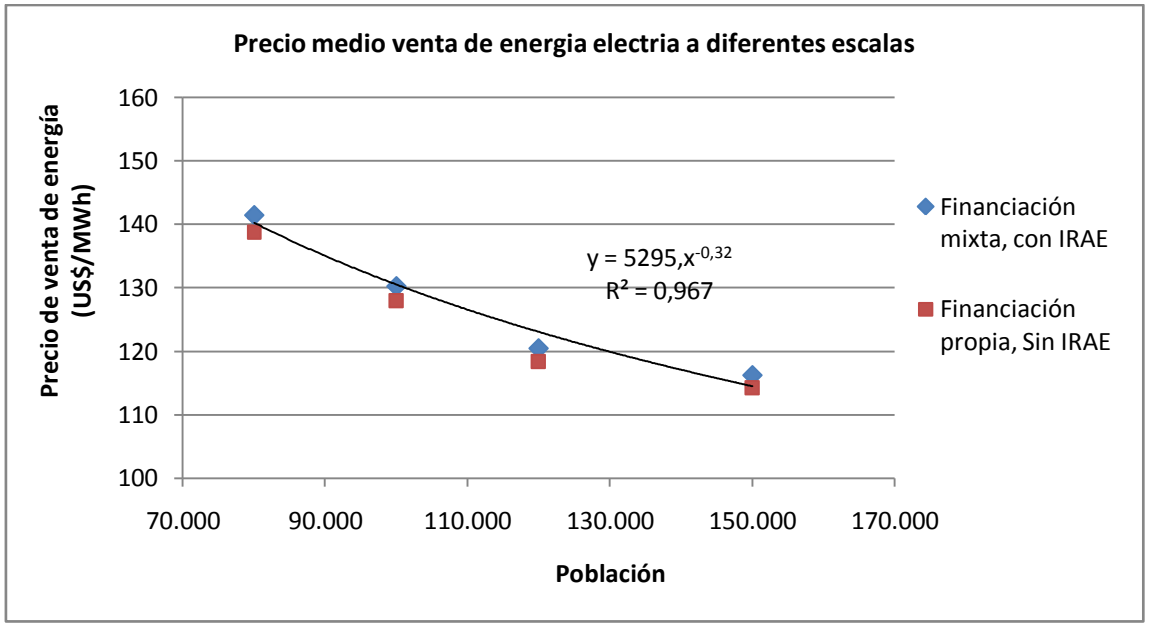


Gráfico 16.- Precio de venta de energía para VAN=0, módulos 5 años

2 Análisis de regionalización

2.1 Regionalización Preliminar

Para abordar la regionalización, en primera instancia se determinará la distancia máxima de transporte de residuos, para localidades con poblaciones mayores a 10.000. Se considerará como hipótesis, que el costo del transporte al relleno regional, no debe superar el costo de disposición final de los residuos.

La tabla empleada para determinar la máxima distancia a recorrer por localidad se presenta en los anexos.

2.1.1 Costos de transporte

Se separaron los costos de transporte en dos componentes: por un lado los costos asociados a los kilómetros recorridos por el camión que transporta los RS hacia el RSa, y por otro los costos por toneladas a trasladar.

Costos de transporte por km recorrido

Estos costos consideran el combustible, los neumáticos y lubricantes los cuales aumentan linealmente en función a los kilómetros recorridos. A continuación se presenta la Tabla 40, en la cual se muestran los costos tenidos en cuenta.

Costos por km		
Combustible	$U/l	42,5
Neumáticos	$U/neu	2205
Lubricantes	$U/veh	300

Tabla 40.- Costos por km

Considerando a su vez los siguientes rendimientos:

Rendimientos		
Combustible	km/l	1,8
Neumáticos	neu/km-veh	0,0001
Lubricantes	lt/km-veh	0,0048

Tabla 41.- Rendimientos

Resulta un valor total de 0,8 US$/km.

Costos por tonelada transportada

Estos costos consideran la cantidad de camiones necesarios para transportar los residuos generados por localidad teniendo en cuenta la capacidad del camión y la cantidad de viajes que puede realizar el mismo. En particular el costo tenido en cuenta es el salario del choferque conduce el camión.

El salario del chofer fue determinado en función de la escala salarial y categoría del cargo disponible en la página web de la IM.

En la Tabla 42 se presentan los datos considerados para el cálculo, su elección se detalla en la sección 4.1.1 de la Memoria Justificativa.

Camiones	
Capacidad (ton)	10
Viajes que puede hacer por día	2
Salario Chofer (US$/mes)	1553

Tabla 42.- Datos considerados

El número de viajes diarios (un viaje considera la ida y vuelta) se calcula en función de las toneladas diarias a transportar y la capacidad de los camiones, es decir:

$$N_{viajes\ ,d} = Q \cdot C$$

Siendo:

$N_{viajes,d}$: el número de viajes diarios

Q: las toneladas diarias a transportar

C: la capacidad del camión

Luego en función de la cantidad de viajes al día que puede realizar cada camión, se determina el número necesario de camiones y el costo asociado al salario del chofer.

2.1.2 Costos por disposición final

Se asumirá un costo por disposición final de 16US$/ton, que representan los costos de operación y mantenimiento del RSa, ver Sección 4.1.2 de la Memoria Justificativa.

2.1.3 Determinación de la distancia máxima

Como se mencionó anteriormente la hipótesis a tener en cuenta para determinar la distancia máxima será, que el costo del transporte al relleno regional, no debe superar el costo de disposición final de los residuos, por lo tanto:

$$Costo\ por\ disposición\ final\ [US\$/mes] = Costos\ por\ tonelada\ transportada\ [US\$/mes] + Costo\ por\ km\ recorrido\ [US\$/mes]$$

$$16\left(\frac{US\$}{ton}\right) Q\left(\frac{ton}{mes}\right) = S\left(\frac{US\$}{mes}\right) \cdot Nc + 0{,}8\left(\frac{US\$}{km}\right) \cdot 2 \cdot Nv \cdot Máx\ dist.\left(\frac{km}{mes}\right)$$

Despejando la distancia máxima se obtiene:

$$Máximadistancia\left(\frac{km}{mes}\right) = \frac{\left[16\left(\frac{US\$}{ton}\right) Q\left(\frac{ton}{mes}\right)\right] - \left[S\left(\frac{US\$}{mes}\right) \cdot Nc\right]}{0{,}8\left(\frac{US\$}{km}\right) \cdot 2 \cdot Nv}$$

Q: cantidad de residuos a disponer

S: salario del chofer

N_c: cantidad de camiones

N_v: Número de viajes por día (incluye ida y vuelta)

En base a la información de tasas de generación, costos de transporte y disposición final, es posible determinar la distancia máxima a partir de la ecuación anterior.

Finalmente, se corrige la distancia máxima, teniendo en cuenta que cada camión cuenta con 4horas para el transporte y una velocidad máxima de 75 km/h, por lo tanto se obtiene:

Velocidad de transporte	km/h	75
Total km en 4h de transporte	km	300
Nro. máximo de viajes por camión al día		4
Distancia máx.	km	75

Tabla 43.- Distancia máxima de transporte

2.2 Análisis de costos para la región seleccionada

Para la región seleccionada, Mercedes, Fray Bentos y Dolores, se realizará una comparación económica entre dos alternativas posibles para la gestión de residuos: una en la que cada localidad cuenta con su propio RSa y otra donde existe un único RSa común para la región.

Las diferentes componentes de los costos que se analizaron fueron las siguientes:

- Inversión del RSa
- Operación y Mantenimiento del RSa
- Recolección y Transporte
- Generación de energía

2.2.1 Inversión del RSa

Para cada localidad se determinó la población al año 2016 en función de la tasa de crecimiento poblacional anual y la cantidad de residuos generados al 2016 a partir de la tasa de generación.

Los rellenos en estudio estarán constituidos por 4 módulos de 5 años de vida útil, de manera que abarcan un horizonte de proyecto de 20 años.

Para calcular el área necesaria de cada uno de los módulos, se partió de la suposición de una altura útil para cada RSa, se asumió una geometría de los módulos cuadrada en planta y rectangular en corte. Luego, a partir de los residuos que ingresan al relleno en los años de actividad de los módulos y considerando una densidad de compactación de 700 kg/m^3 se determinó el área de cada módulo, obteniéndose luego el área necesaria para los 20 años de vida útil del relleno.

El área total del predio debe tener en cuenta, además de los módulos, la ocupación debido a las diferentes instalaciones como ser: planta de biogás, planta de tratamiento de lixiviado, caminería, estacionamiento, oficinas y vestuarios, entre otros. A efectos del análisis se consideró que el área total del predio es 1,5 veces el área total de los módulos.

El caudal máximo de biogás se calculó teniendo en cuenta que se comienza a captar una vez que los módulos son clausurados.

A continuación se presentan los datos obtenidos para cada relleno:

Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional
Datos generales				
Población (Censo 2011)	41.974	24.406	17.174	83.554
Tasa Crecimiento de población anual	1,001	1,001	1,005	1,007
Población (2016)	42.184	24.528	17.608	86.305
Tasa de generación (kg/hab/día)	0,73	0,73	0,70	0,72
Residuos generados al 2016 (ton/día)	30,8	17,9	12,3	62,1
Datos del Relleno				
Altura útil (m)	6	5	4	13
Área por módulo (ha)				
Módulo 1	1,34	0,94	0,81	2,50
Módulo 2	1,35	0,94	0,83	2,58
Módulo 3	1,35	0,94	0,85	2,67
Módulo 4	1,36	0,95	0,87	2,75
Área total módulos (ha)	5,40	3,77	3,37	10,50
Perímetro módulos(m)	929,8	776,7	734,4	1200,7
Perímetro por módulo (m^2)				
Módulo 1	463,2	386,9	360,3	626,2
Módulo 2	464,3	387,9	364,8	581,9
Módulo 3	465,5	388,8	369,4	591,4
Módulo 4	466,7	389,8	374,0	601,0
Área total predio (ha)	8,11	5,66	5,06	15,76
Perímetro total (m)	1138,8	951,3	899,4	1587,7
Generación de Biogás				
Caudal máximo biogás (m3/h)	44,9	26,1	19,0	130,2

Tabla 44.- Datos rellenos locales y regional

2.2.1.1 Costos de inversión

Implantación de la obra:

Dentro de estos costos se consideran la instalación y mantenimiento del obrador, el replanteo general y el suministro y colocación del centro perimetral.

Para el metraje del replanteo general y cerco perimetral se consideró el área y el perímetro del total del predio respectivamente.

Rubro	Unidad	Metraje	Costo unitario (US$/unidad)	Costo total (US$)
Mercedes				
Instalación y mantenimiento del obrador	unidad	1	2667	2.667
Replanteo general	m^2	54035	0,5	27.018
Suministro y colocación de cerco perimetral	m	1139	75	85.409
			TOTAL	**115.094**
Fray Bentos				
Instalación y mantenimiento del obrador	unidad	1	2667	2.667
Replanteo general	m^2	37703	0,5	18.852
Suministro y colocación de cerco perimetral	m	951	75	71.344
			TOTAL	**92.862**
Dolores				
Instalación y mantenimiento del obrador	unidad	1	2667	2.667
Replanteo general	m^2	33707	0,5	16.854
Suministro y colocación de cerco perimetral	m	979	75	67.457
			TOTAL	**86.977**
Regional				
Instalación y mantenimiento del obrador	unidad	1	2667	2.667
Replanteo general	m^2	105036	0,5	52.518
Suministro y colocación de cerco perimetral	m	1588	75	119.079
			TOTAL	**174.264**

Tabla 45.- Implantación de obra

Infraestructura general:

La infraestructura general comprende la compra del terreno, oficinas y vestuarios, balanza, casetas de control, columnas y luminarias, estacionamiento, planta de tratamiento de lixiviados y captación y quema de biogás.

Para la compra del terreno se consideró un precio por hectárea según el Departamento obtenido del informe: "PRECIO DE LA TIERRA" Compraventas Año 2015, del 3 de marzo de 2016 del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca a través de Estadísticas Agropecuarias (DIEA).

Para la balanza, casetas de control, columnas y luminarias se consideraron precios promedios por unidad que se manejan en el mercado local.

El precio de las oficinas y vestuarios se fijó teniendo como referencia los precios de construcción por m^2 para diferentes tipos de viviendas presentados en el informe "Precios de construcción de viviendas" elaborados por el INE, mayo 2015.

Para la antorcha y sistema de bombeo de biogás se consideraron los precios utilizados para los análisis anteriores, ver sección 2.6.2. de la Memoria Justificativa.

Respecto al dimensionado de las lagunas de estabilización para el tratamiento del lixiviado, como se menciona en la Sección 4.2.1. de la Memoria Justificativa, se realizará a partir de una

relación de áreas entre los módulos y las lagunas. Dicha relación se obtuvo a partir de las dimensiones de las lagunas del relleno regional las cuales sí fueron diseñadas en detalle, siendo aproximadamente un 2,7 % del área total de los módulos.

A continuación se presentan los costos de inversión en infraestructura general para cada uno de los rellenos en estudio:

Rubro	Unidad	Metraje	Costo unitario (US$)	Costo total (US$)
Mercedes				
Compra terreno	ha	8	6287	50.958
Oficinas y vestuario	m2	200	750	150.000
Balanza	unidad	1	30.000	30.000
Casetas de control	unidad	2	500	1.000
Columnas + Luminaria	unidad	19	500,0	9.500
Estacionamiento	m2	54	30	1.621
Planta de Tratamiento				**18.729**
Excavación	m3	2183	4	8.451
Arcilla compactada	m3	437	4	1.661
Suministro y colocación de geomembrana	m2	1456	6	8.617
Captación y quema de biogás				**8.866**
Antorcha	m3/h biogás	45	60	2.693
Sistema de bombeo	m3/h biogás	45	137,5	6.172
			TOTAL	**270.674**
Fray Bentos				
Compra terreno	ha	6	6.236	35.268
Oficinas y vestuario	m2	200	750	150.000
Balanza	unidad	1	30.000	30.000
Casetas de control	unidad	2	500	1.000
Columnas + Luminaria	unidad	16	500,0	8.000
Estacionamiento	m2	38	30	1.131
Planta de Tratamiento				**13.069**
Excavación	m3	1523	4	5.897
Arcilla compactada	m3	305	4	1.159
Suministro y colocación de geomembrana	m2	1016	6	6.013
Captación y quema de biogás				**5.155**
Antorcha	m3/h biogás	26,10	60	1.566
Sistema de bombeo	m3/h biogás	26,10	137,5	3.589
			TOTAL	**243.622**

Rubro	Unidad	Metraje	Costo unitario (US$/unidad)	Costo total (US$)
Dolores				
Compra terreno	ha	5	6287	31.787
Oficinas y vestuario	m2	200	750	150.000
Balanza	unidad	1	30000	30.000
Casetas de control	unidad	2	500	1.000
Columnas + Luminaria	unidad	15	500	7.500
Estacionamiento	m2	34	30	1.011
Planta de Tratamiento				**11.683**
Excavación	m3	1362	4	5.272
Arcilla compactada	m3	272	4	1.036
Suministro y colocación de geomembrana	m2	908	6	5.375
Captación y quema de biogás				**3.760**
Antorcha	m3/h biogás	19,04	60	1.142
Sistema de bombeo	m3/h biogás	19,04	137,5	2.617
			TOTAL	**236.742**
Regional				
Compra terreno	ha	15,8	6.287	99.055
Oficinas y vestuario	m2	200	750	150.000
Balanza	unidad	1	30.000	30.000
Casetas de control	unidad	2	500	1.000
Columnas + Luminaria	unidad	26	500,0	13.000
Estacionamiento	m2	105	30	3.151
Planta de Tratamiento				**38.807**
Excavación	m3	4773	4	18.473
Arcilla compactada	m3	942	4	3.584
Suministro y colocación de geomembrana	m2	2830	6	16.751
Captación y quema de biogás				**25.722**
Antorcha	m3/h biogás	130,2	60	7.814
Sistema de bombeo	m3/h biogás	130,2	137,5	17.907
			TOTAL	**360.734**

Construcción de módulos:

La construcción de los módulos prevé los costos asociados al movimiento de suelos, caminería, impermeabilización del fondo del vertedero, manto drenante y conducción de lixiviados.

Al trabajar con rellenos de diferentes escalas, se tiene para una misma tarea (por ej. excavación) distintos costos unitarios en función de la localidad. Debido a que en este análisis se busca representar el efecto del factor de escala sobre los costos, se procede a determinar el costo unitario de cada tarea para cada una de las localidades. Como se verá a lo largo del capítulo, para algunas tareas los costos unitarios de las diferentes localidades son muy similares pero en otros las diferencias son más significativas.

El rendimiento de las máquinas dependen en particular de la tarea que se esté realizando, por lo tanto para definir dichos rendimientos se consultó al Ing. Civil Bernardo García que cuenta

con amplia experiencia en el tema. Dichos rendimientos están expresados en volumen suelto, porque es el volumen que, en general, se puede medir en la obra (volumen transporte).

Las relaciones entre los diferentes estados de los materiales: banco, carga y compactado utilizadas se presentan en la Tabla 46.

	Relaciones entre estados de los materiales		
	Coeficiente esponjamiento (Vcarga/Vbanco)	Coeficiente compactado (Vcompactado/Vcarga)	Coeficiente contracción (Vcompactado/Vbanco)
Arena	1,11	0,86	0,95
Arcilla	1,43	0,63	0,90
Tosca	1,11	0,86	0,95
Capa vegetal	1,2	0,75	0,9

Tabla 46.- Relaciones entre estados de los materiales

Los costos diarios considerados para el alquiler de cada maquinaria, con maquinista incluido, fueron los siguientes:

Costo unitario (US$/día)	
Bulldozer D8	1600
Pala cargadora	550
Camion	200
Pata de cabra	450
Bulldozer D6	400
Moto niveladora	650

Tabla 47.- Costo unitario, maquinaria

Movimiento de suelos:

El movimiento de suelos contempla las tareas de retiro y acopio de la capa vegetal, excavación y terraplenado. A continuación se presentan los cálculos del costo unitario en función de las diferentes tareas (arranque, carga, transporte, tendido y compactación).

La maquinaria utilizada para las diferentes tareas del movimiento de suelo son: Bulldozer para el arranque, Pala Cargadora y camión para la carga y transporte, Motoniveladora para el tendido y rodillo Pata de Cabra para la compactación.

Se parte de la hipótesis de que las máquinas y los camiones trabajan la misma cantidad de días, ya que las tareas deben ser realizadas en conjunto. Bajo esta hipótesis se calculó la cantidad de camiones y palas necesarias. Asimismo, se incluye una cuadrilla de 3 peones que acompañan las tareas de carga y transporte.

Por otro lado, se supuso que los suelos donde se proyectan los rellenos son arcillosos y por lo tanto se podrá usar la arcilla obtenida de la excavación de los módulos para las diferentes tareas; en caso de no ser así se deberían considerar los costos por la compra y traslado del material.

1- Retiro y acopio de la capa vegetal

El destape y acopio de la cobertura vegetal comprende las etapas de arranque, carga y transporte de una capa de 30 cm de cobertura vegetal. El área a desmontar corresponde al área de cada módulo. En la Tabla 48, se presentan los costos unitarios obtenidos:

Retiro y acopio de la capa vegetal					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimientos (m^3/día)
Bulldozer D8	1	1	1	1	1400
Pala cargadora	2	2	2	2	700
Camión	6	7	6	7	200
Peones (cantidad)	3	3	3	3	
Días de trabajo	5	3	3	8	
Costo unitario (US$/$m^3$)	1,50	1,35	1,49	1,35	

Tabla 48.- Costo unitario limpieza y acopio de la capa vegetal

2- Excavación

El método de vertido seleccionado para los diferentes rellenos es el de celda excavada, la profundidad de excavación se seleccionó teniendo en cuenta el balance de material de cubrición, ver Sección 4.5.1 Memoria Justificativa. Se obtuvo que excavando una profundidad de 1,5 m para cada módulo, se logra cubrir las necesidades de cubrición diaria e intermedia en un 85 – 95%.

Análogamente al retiro y acopio de la capa vegetal se calcula el costo unitario de la excavación de los módulos.

Excavación					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimientos (m^3/día)
Bulldozer D8	2	1	1	4	1800
Pala cargadora	4	2	2	8	900
Camión	18	9	9	36	200
Peones (cantidad)	3	3	3	3	
Días de trabajo	8	12	10	9	
Costo unitario (US$/$m^3$)	3,63	3,95	3,79	3,62	

Tabla 49.- Costo unitario, excavación

3- Terraplenado (acondicionamiento del material acopiado)

El material extraído de la excavación debe ser trasladado hacia un sitio de forma de no interferir con el funcionamiento del relleno y evitar el arrastre del mismo durante la operativa diaria. Allí será depositado y compactado conformando un terraplén.

El tendido del mismo se realiza con un Bulldozer D4.Su rendimiento en este caso, está condicionado por el rendimiento de las máquinas que realizan la excavación, es decir el

Bulldozer va a tener que ser capaz de tender la misma cantidad de m^3/dia que son arrancados de la excavación. Probablemente la maquina trabajará exigida pero para realizar el tendido del material no se necesita alta calidad del trabajo.

Se obtuvieron los siguientes costos unitarios:

Terraplenado					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimiento (m^3/día)
Bulldozer D6	2	1	1	4	1800
Días de trabajo	8	12	10	9	
Costo unitario (US$/m3)	0,72	0,83	0,80	0,70	

Tabla 50.- Costo unitario, terraplenado

Caminería:

Las obras de caminería interna y acceso son necesarias para el tránsito de los camiones y maquinarias encargadas de la operación y mantenimiento del RSa.

Para el cálculo de los costos asociados se supuso que la caminería tiene un ancho de 6 m y se extiende a lo largo del perímetro de cada módulo y una calle interna que cruce de lado a lado, de manera que se tenga amplia accesibilidad. Resulta entonces la longitud total de la caminería aproximadamente cinco veces el lado del módulo.

Las tareas comprenden el destape y acopio de una capa de 30 cm de cobertura vegetal, la colocación de 30 cm de arcilla y 30 cm de tosca.

1- *Limpieza de capa vegetal*

La limpieza de la capa vegetal se realiza directamente con la Motoniveladora y a medida que se va limpiando se van conformando las cunetas. El costo unitario para cada localidad es de:

Limpieza de capa vegetal					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimiento (m/día)
Motoniveladora	1	1	1	1	400
Días de trabajo	2	2	2	3	
Costo unitario (US$/m3)	1,87	2,24	2,41	2,05	

Tabla 51.- Costo unitario, limpieza capa vegetal

2- *Colocación de arcilla*

Se realiza la recarga con 30 cm de arcilla de mejor calidad, pues la subrasante generalmente es tierra negra de mala calidad. Como se mencionó anteriormente, se supone que la arcilla utilizada es la obtenida de la excavación de los módulos.

Colocación de arcilla					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimiento (m^3/día)
Pala cargadora	1	1	1	1	900
Camión	4	5	4	4	200
Peón	3	3	3	3	
Días de trabajo	3	2	2	4	
Costo unitario (US$/m3)	3,17	2,88	2,72	3,10	

Tabla 52.- Costo unitario, colocación de arcilla

3- *Colocación de tosca*

Se colocan 30 cm de tosca. El costo unitario considerado por la compra de la misma es de 19 US$/$m^3$ suelto puesto en el lugar. Para determinar el costo de la colocación de tosca, se calculan los días necesarios de trabajo en función del volumen suelto de material y asumiendo que llegan al sitio 600 m^3 de tosca diarios[3]. Además, la Motoniveladora, el Pata de cabra y la cuadrilla conformada por 3 peones trabajan la misma cantidad de días.

Colocación de tosca					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimiento (m^3/día)
Motoniveladora 120G (tendido)	1	1	1	1	485
Pata de cabra	1	1	1	1	485
Peón	3	3	3	3	
Volumen de tosca (m3)	1454	1215	1131	1987	
Días de trabajo	3	3	2	4	
Costo unitario (US$/m3)	30,12	30,81	29,62	30,03	

Tabla 53.- Costo unitario, colocación de tosca

[3]Fuente: comunicación personal – Ing. Bernardo García

Impermeabilización del fondo y manto drenante:

1- Arcilla compactada:

Para impermeabilizar el fondo y taludes se colocan 60 cm de arcilla compactada, la arcilla debe ser cargada y transportada desde el sitio de acopio. El costo unitario es de:

Arcilla compactada					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimiento (m^3/día)
Pala cargadora	2	1	1	2	900
Camión	9	5	5	9	200
Pata de cabra	2	1	1	2	900
Peón	3	3	3	3	
Días de trabajo	9	12	11	16	
Costo unitario (US$/m3)	3,39	3,41	3,56	3,28	

Tabla 54.- Costo unitario, arcilla compactada

2- Geomembrana:

La geomembrana es de PEAD de 1,5 mm de espesor, la misma tiene un costo unitario que comprende el suministro y la colocación de 5,9 US$/$m^2$.

3- Manto de arena:

La colocación del manto de arena comprende las tareas de compra del material y tendido del mismo, el costo unitario de la arena puesta en el sitio es de 25,5 US$/$m^3$.

Manto de arena					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimiento (m^3/día)
Motoniveladora 120G	1	1	1	2	1040
Peón	2	2	2	2	
Volumen de arena (m3)	4022	2807	2434	8734	
Días de trabajo	4	3	3	5	
Costo unitario (US$/m3)	32,79	32,85	33,00	32,86	

Tabla 55.- Costo unitario, manto de arena

4- Piedra partida para dren:

Para el cálculo del metraje de piedra partida, se supuso que la misma rellenará un área aproximada de 0,04 m^2 (20 cm x 20 cm), considerando que los diámetros de las tuberías serán del orden de 110 mm. El costo unitario de la piedra partida es de 40 US$/$m^3$.

5- Tuberías de PVC:

Para las tuberías primarias y secundarias que captan y conducen el lixiviado dentro de los módulos, se supuso un diámetro de 110 mm. La configuración adoptada estas tuberías se

detalla en la Sección 4.2.1, de la Memoria Justificativa, la longitud de las mismas se determinó para cada módulo, como:

$$L_{tuber\ ías} = L_{primarias} + L_{secundarias} = 2 \cdot (L_{módulo} - 10m) + 16 \cdot \left(\frac{L_{módulo}}{4} - 5m\right)$$

Por otro lado, las tuberías que conducen los lixiviados fuera de los módulos hasta la planta de tratamiento fueron supuestas con un diámetro de 200 mm y una longitud estimada de 100 m. También se consideraron 3 cámaras de diámetro 1200 mm para cada módulo.

A continuación se presentan los costos de inversión en la construcción de cada Módulode los rellenos en estudio:

Localidad: MERCEDES				
Módulo 1			Área (ha)	1,34
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				107.582
Retiro de la capa vegetal	m2	13408	1,5	20.091
Excavación	m3	20112	3,6	72.945
Terraplenado	m3	20112	0,7	14.545
Caminería				36.988
Limpieza de la capa vegetal	m	695	1,9	1.300
Colocación de Arcilla	m2	1388	3,2	4.405
Colocación de Tosca	m3	1039	30	31.283
Impermeabilización del fondo				127.643
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	10403	3,4	35.264
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	15605	5,9	92.380
Manto drenante y conducción de lixiviado				170.499
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	3218	32,8	105.484
Geotextil	m2	15605	3,8	58.518
Piedra partida para dren	m3	24	40,0	952
Tubería PVC D110	m	595	4	2.379
Tubería PVC D200	m	100	50	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500	1.500
			TOTAL	**442.712**
Módulo 2			Área (ha)	1,35
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				108.121
Retiro de la capa vegetal	m2	13475	1,5	20.192
Excavación	m3	20212	3,6	73.311
Terraplenado	m3	20212	0,7	14.618
Caminería				37.080
Limpieza de la capa vegetal	m	696	1,9	1.303
Colocación de Arcilla	m2	1392	3,2	4.416
Colocación de Tosca	m3	1041	30	31.361
Impermeabilización del fondo				128.238
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	10452	3,4	35.428
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	15677	5,9	92.810
Manto drenante y conducción de lixiviado				169.719
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	3234	32,8	106.013
Geotextil	m2	15677	3,8	58.790
Piedra partida para dren	m3	24	40,0	954
Tubería PVC D110	m	596	4	795

Tubería PVC D200	m	100	50	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500	1.500
			TOTAL	**443.158**

Módulo 3			Área (ha)	1,35
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				108.662
Retiro de la capa vegetal	m2	13542	1,5	20.293
Excavación	m3	20314	3,6	73.678
Terraplenado	m3	20314	0,7	14.692
Caminería				37.173
Limpieza de la capa vegetal	m	698	1,9	1.307
Colocación de Arcilla	m2	1395	3,2	4.427
Colocación de Tosca	m3	1044	30	31.440
Impermeabilización del fondo				128.853
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	10500	3,4	35.593
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	15750	5,9	93.242
Manto drenante y conducción de lixiviado				170.529
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	3250	32,8	106.544
Geotextil	m2	15750	3,8	59.064
Piedra partida para dren	m3	24	40,0	957
Tubería PVC D110	m	598	4,0	798
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**445.199**

Módulo 4			Área (ha)	1,36
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				109.207
Retiro de la capa vegetal	m2	13610	1,5	20.394
Excavación	m3	20415	3,6	74.047
Terraplenado	m3	20415	0,7	14.765
Caminería				37.266
Limpieza de la capa vegetal	m	700	1,9	1.310
Colocación de Arcilla	m2	1399	3,2	4.438
Colocación de Tosca	m3	1046	30	31.518
Impermeabilización del fondo				129.435
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	10549	3,4	35.759
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	15824	5,9	93.677
Manto drenante y conducción de lixiviado				171.343
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	3798	32,8	107.077
Geotextil	m2	15824	3,8	59.339
Piedra partida para dren	m3	24	40,0	960
Tubería PVC D110	m	600	4,0	800
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**447.251**

LOCALIDAD: Fray Bentos				
Módulo 1			Área (ha)	0,94
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				79.691
Retiro de la capa vegetal	m2	9355	1,4	12.655

Excavación	m3	14033	3,9	55.418
Terraplenado	m3	14033	0,8	11.618
Caminería				31.369
Limpieza de la capa vegetal	m	580	2,2	1.300
Colocación de Arcilla	m3	1160	2,9	3.336
Colocación de Tosca	m3	868	30,8	26.733
Impermeabilización del fondo				91.666
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	7460	3,4	25.418
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	11190	5,9	66.248
Manto drenante y conducción de lixiviado				121.575
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	2245	32,8	73.754
Geotextil	m2	11190	3,8	41.964
Piedra partida para dren	m3	19	40,0	769
Tubería PVC D110	m	480	4,0	1.921
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**324.301**

Módulo 2			Área (ha)	0,94
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				80.090
Retiro de la capa vegetal	m2	9402	1,4	12.718
Excavación	m3	14103	3,9	55.696
Terraplenado	m3	14103	0,8	11.676
Caminería				31.448
Limpieza de la capa vegetal	m	582	2,2	1.303
Colocación de Arcilla	m3	1162	2,9	3.345
Colocación de Tosca	m3	870	30,8	26.800
Impermeabilización del fondo				92.087
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	7495	3,4	25.535
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	11242	5,9	66.552
Manto drenante y conducción de lixiviado				122.146
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	2257	32,8	74.124
Geotextil	m2	11242	3,8	42.157
Piedra partida para dren	m3	19	40,0	771
Tubería PVC D110	m	482	4,0	1.927
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**325.771**

Módulo 3			Área (ha)	0,94
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				80.491
Retiro de la capa vegetal	m2	9449	1,4	12.782
Excavación	m3	14174	3,9	55.975
Terraplenado	m3	14174	0,8	11.735
Caminería				31.527
Limpieza de la capa vegetal	m	583	2,2	1.307
Colocación de Arcilla	m3	1165	2,9	3.353
Colocación de Tosca	m3	872	30,8	26.867
Impermeabilización del fondo				92.511
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	7529	3,4	25.653
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	11294	5,9	66.858
Manto drenante y conducción de lixiviado				122.719

Manto de arena (e = 30 cm)	m3	2268	32,8	74.495
Geotextil	m2	11294	3,8	42.351
Piedra partida para dren	m3	19	40,0	773
Tubería PVC D110	m	483	4,0	1.933
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**327.248**

Módulo 4			Área (ha)	0,95
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				80.895
Retiro de la capa vegetal	m2	9497	1,4	12.846
Excavación	m3	14245	3,9	56.255
Terraplenado	m3	14245	0,8	11.794
Caminería				31.605
Limpieza de la capa vegetal	m	585	2,2	1.310
Colocación de Arcilla	m3	1168	2,9	3.361
Colocación de Tosca	m3	874	30,8	26.934
Impermeabilización del fondo				92.936
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	7564	3,4	25.771
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	11346	5,9	67.166
Manto drenante y conducción de lixiviado				123.295
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	2279	32,8	74.868
Geotextil	m2	11346	3,8	42.546
Piedra partida para dren	m3	19	40,0	776
Tubería PVC D110	m	485	4,0	1.939
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**328.732**

LOCALIDAD: Dolores				
Módulo 1			Área (ha)	0,81
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				67.918
Retiro de la capa vegetal	m2	8114	1,5	12.055
Excavación	m3	12171	3,8	46.182
Terraplenado	m3	12171	0,8	9.682
Caminería				28.166
Limpieza de la capa vegetal	m	540	2,4	1.300
Colocación de Arcilla	m3	1080	2,7	2.936
Colocación de Tosca	m3	808	29,6	23.930
Impermeabilización del fondo				81.454
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	6549	3,6	23.300
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	9823	5,9	58.154
Manto drenante y conducción de lixiviado				106.731
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	1947	33,0	64.260
Geotextil	m2	9823	3,8	36.837
Piedra partida para dren	m3	18	40,0	705
Tubería PVC D110	m	440	4,0	1.762
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**284.269**
Módulo 2			Área (ha)	0,83
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				69.633
Retiro de la capa vegetal	m2	8319	1,5	12.359
Excavación	m3	12479	3,8	47.348
Terraplenado	m3	12479	0,8	9.926
Caminería				28.519
Limpieza de la capa vegetal	m	547	2,4	1.316
Colocación de Arcilla	m3	1093	2,7	2.973
Colocación de Tosca	m3	818	29,6	24.230
Impermeabilización del fondo				83.331
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	6700	3,6	23.837
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	10050	5,9	59.494
Manto drenante y conducción de lixiviado				109.240
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	1997	33,0	65.883
Geotextil	m2	10050	3,8	37.686
Piedra partida para dren	m3	18	40,0	716
Tubería PVC D110	m	447	4,0	1.789
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**290.724**

Módulo 3			Área (ha)	0,85
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				71.392
Retiro de la capa vegetal	m2	8529	1,5	12.671
Excavación	m3	12794	3,8	48.544
Terraplenado	m3	12794	0,8	10.177
Caminería				28.877
Limpieza de la capa vegetal	m	554	2,4	1.333
Colocación de Arcilla	m3	1107	2,7	3.011

Colocación de Tosca	m3	828	29,6	24.534
Impermeabilización del fondo				85.253
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	6854	3,6	24.387
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	10281	5,9	60.866
Manto drenante y conducción de lixiviado				111.811
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	2047	33,0	67.546
Geotextil	m2	10281	3,8	38.555
Piedra partida para dren	m3	18	40,0	727
Tubería PVC D110	m	454	4,0	1.816
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**342.071**

Módulo 4			Área (ha)	0,87
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				73.194
Retiro de la capa vegetal	m2	8745	1,5	12.991
Excavación	m3	13117	3,8	49.769
Terraplenado	m3	13117	0,8	10.434
Caminería				29.240
Limpieza de la capa vegetal	m	561	2,4	1.350
Colocación de Arcilla	m3	1121	2,7	3.048
Colocación de Tosca	m3	839	29,6	24.842
Impermeabilización del fondo				87.221
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	7013	3,6	24.950
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	10519	5,9	62.271
Manto drenante y conducción de lixiviado				114.446
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	2099	33,0	69.252
Geotextil	m2	10519	3,8	39.446
Piedra partida para dren	m3	18	40,0	738
Tubería PVC D110	m	461	4,0	1.844
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**339.079**

LOCALIDAD: Regional				
Módulo 1			Área (ha)	2,50
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				228.473
Retiro de la capa vegetal	m2	25039	1,3	33.745
Excavación	m3	45069	3,6	163.064
Terraplenado	m3	45069	0,7	31.664
Caminería				49.815
Limpieza de la capa vegetal	m	949	2,1	1.950
Colocación de Arcilla	m3	1897	2,8	5.236
Colocación de Tosca	m3	1419	30,0	42.629
Impermeabilización del fondo				232.248
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	19094	3,3	62.691
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	28641	5,9	169.557
Manto drenante y conducción de lixiviado				316.684
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	6009	33,5	201.356
Geotextil	m2	28641	3,8	107.405
Piedra partida para dren	m3	34	40,0	1.359
Tubería PVC D110	m	849	4,0	3.398
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**827.219**
Módulo 2			Área (ha)	2,58
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				235.740
Retiro de la capa vegetal	m2	25835	1,3	34.819
Excavación	m3	46503	3,6	168.250
Terraplenado	m3	46503	0,7	32.671
Caminería				50.601
Limpieza de la capa vegetal	m	964	2,1	1.981
Colocación de Arcilla	m3	1927	2,8	5.319
Colocación de Tosca	m3	1442	30,0	43.301
Impermeabilización del fondo				239.166
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	19663	3,3	64.558
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	29495	5,9	174.608
Manto drenante y conducción de lixiviado				326.372
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	6200	33,5	207.760
Geotextil	m2	29495	3,8	110.605
Piedra partida para dren	m3	35	40,0	1.383
Tubería PVC D110	m	864	4,0	3.458
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**851.879**
Módulo 3			Área (ha)	2,67
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				257.737
Retiro de la capa vegetal	m2	26657	1,3	35.927
Excavación	m3	47983	3,6	173.604
Terraplenado	m3	68615	0,7	48.206
Caminería				51.400
Limpieza de la capa vegetal	m	980	2,1	2.012
Colocación de Arcilla	m3	1957	2,8	5.403
Colocación de Tosca	m3	1465	30,0	43.985

Impermeabilización del fondo				246.301
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	20250	3,3	66.484
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	30374	5,9	179.817
Manto drenante y conducción de lixiviado				336.369
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	6398	33,5	214.372
Geotextil	m2	30374	3,8	113.904
Piedra partida para dren	m3	35	40,0	1.407
Tubería PVC D110	m	880	4,0	3.518
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**891.807**
Módulo 4			Área (ha)	2,75
Rubro	**Unidad**	**Metraje**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Movimiento de suelo				250.986
Retiro de la capa vegetal	m2	27506	1,3	37.071
Excavación	m3	49511	3,6	179.132
Terraplenado	m3	49511	0,7	34.784
Caminería				49.948
Limpieza de la capa vegetal	m	995	2,1	2.044
Colocación de Arcilla	m3	1168	2,8	3.225
Colocación de Tosca	m3	1488	30,0	44.679
Impermeabilización del fondo				253.660
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	20855	3,3	68.471
Geomembrana (e = 1,5 mm)	m2	31282	5,9	185.189
Manto drenante y conducción de lixiviado				346.684
Manto de arena (e = 30 cm)	m3	6601	33,5	221.197
Geotextil	m2	31282	3,8	117.307
Piedra partida para dren	m3	36	40,0	1.432
Tubería PVC D110	m	895	4,0	3.580
Tubería PVC D200	m	100	50,0	1.667
Cámara D 1200mm	unidad	3	500,0	1.500
			TOTAL	**901.279**

Clausura de módulos:

Dentro de la clausura de los módulos se consideran los costos asociados a la cobertura final y al sistema de recolección de biogás.

Una vez finalizada la vida útil del relleno el mismo debe ser clausurado mediante la colocación de una capa de arcilla compactada de 0,6 m de espesor y conductividad hidráulica máxima de $1x10^{-7}$ cm/s, según las recomendaciones de la Propuesta Técnica de Reglamentación GESTA Residuos de 16/06/03

La clausura de los módulos consiste en la colocación de una capa de arcilla compactada de 0,6 m de espesor, geodren de 8 mm de espesor, cuyo costo unitario es de 2,5 US$/$m^2$, y de una capa vegetal empastada de 0,4 m. Las etapas a desarrollar para la colocación de los materiales son carga, transporte, tendido y compactado. Los costos unitarios de cada tarea son los siguientes:

1- Arcilla compactada

Arcilla compactada					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimiento (m^3/día)
Pala cargadora	2	2	2	2	900
Camión	8	9	8	9	200
Pata de cabra	2	2	2	2	773
Motoniveladora 120G (tendido)	2	2	2	1	1040
Peón	3	3	3	3	
Días de trabajo	8	5	5	14	
Costo unitario (US$/m3)	4,49	4,18	4,64	3,87	

Tabla 56.- Costo unitario, arcilla compactada

2- Tierra vegetal

Tierra vegetal					
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	
	Cantidad				Rendimiento (m^3/día)
Pala cargadora	2	2	2	2	800
Camión	8	7	7	9	200
Pata de cabra	2	2	2	2	645
Moto niveladora 120G (tendido)	2	1	2	1	1040
Peón	3	3	3	3	
Días de trabajo	4	4	5	9	
Costo unitario (US$/m3)	5,05	3,94	5,34	3,69	

Tabla 57.- Costos unitarios, tierra vegetal

A continuación se presentan los costos de inversión por la clausura de cada módulo de los rellenos en estudio:

LOCALIDAD: Mercedes				
Módulo 1			Área (ha)	1,34
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	8938	4,5	40.145
Geodren (8 mm)	m2	13408	2,5	33.519
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	5959	5,1	30.109
Captación de biogás				53.631
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	53.631
			TOTAL	**157.405**
Módulo 2			Área (ha)	1,35
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	8983	4,5	40.347
Geodren (8 mm)	m2	13475	2,5	33.687
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	5989	5,1	30.260
Captación de biogás				53.899
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	53.899
			TOTAL	**158.193**
Módulo 3			Área (ha)	1,35
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	9028	4,5	40.549
Geodren (8 mm)	m2	13542	2,5	33.856
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	6019	5,1	30.412
Captación de biogás				54.170
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	54.170
			TOTAL	**158.986**
Módulo 4			Área (ha)	1,36
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	9073	4,5	40.752
Geodren (8 mm)	m2	13610	2,5	34.026
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	6049	5,1	30.564
Captación de biogás				54.441
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	54.441
			TOTAL	**159.782**

LOCALIDAD: Fray Bentos				
Modulo 1			Área (ha)	0,94
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	6237	4,2	26.091
Geodren (8 mm)	m2	9355	2,5	23.388
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	6237	4,2	25.969
Captación de biogás				37.421
Sistema de recolección	ha	0,94	40000,0	37.421
			TOTAL	**112.869**
Modulo 2			Área (ha)	0,94
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	6268	4,2	26.222
Geodren (8 mm)	m2	9402	2,5	23.505
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	6268	4,2	26.099
Captación de biogás				37.609
Sistema de recolección	ha	0,94	40000,0	37.609
			TOTAL	**113.435**
Modulo 3			Área (ha)	0,94
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	6300	4,2	26.353
Geodren (8 mm)	m2	9449	2,5	23.623
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	6300	4,2	26.230
Captación de biogás				37.797
Sistema de recolección	ha	0,94	40000,0	37.797
			TOTAL	**114.003**
Modulo 4			Área (ha)	0,95
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	6331	4,2	26.485
Geodren (8 mm)	m2	9497	2,5	23.742
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	6331	4,2	26.361
Captación de biogás				37.986
Sistema de recolección	ha	0,95	40000,0	37.986
			TOTAL	**114.574**

LOCALIDAD: Dolores				
Modulo 1			Área (ha)	0,81
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	5409	4,6	25.091
Geodren (8 mm)	m2	8114	2,5	20.286
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	5409	4,6	25.091
Captación de biogás				32.457
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	32.457
			TOTAL	**102.924**
Modulo 2			Área (ha)	0,83
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	5546	4,6	25.724
Geodren (8 mm)	m2	8319	2,5	20.798
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	5546	4,6	25.724
Captación de biogás				33.276
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	33.276
			TOTAL	**105.523**
Modulo 3			Área (ha)	0,85
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	5686	4,6	26.374
Geodren (8 mm)	m2	8529	2,5	21.323
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	5686	4,6	26.374
Captación de biogás				34.117
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	34.117
			TOTAL	**108.188**
Modulo 4			Área (ha)	0,87
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	5830	4,6	27.040
Geodren (8 mm)	m2	8745	2,5	21.861
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	5830	4,6	27.040
Captación de biogás				34.978
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	34.978
			TOTAL	**110.920**

LOCALIDAD: Regional				
Modulo 1			Área (ha)	2,50
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	16692	3,9	64.605
Geodren (8 mm)	m2	25039	2,5	62.596
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	11128	3,7	41.114
Captación de biogás				56.100
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	56.100
			TOTAL	**224.414**
Modulo 2			Área (ha)	2,58
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	17223	3,9	66.659
Geodren (8 mm)	m2	25835	2,5	64.587
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	11482	3,7	42.421
Captación de biogás				58.655
Sistema de recolección	ha	1	40000,0	58.655
			TOTAL	**232.323**

Modulo 3			Área (ha)	2,67
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	17771	3,9	68.781
Geodren (8 mm)	m2	26657	2,5	66.643
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	11848	3,7	43.771
Captación de biogás				61.301
Sistema de recolección	ha	2	40000,0	61.301
			TOTAL	**240.496**
Modulo 4			Área (ha)	2,75
Rubro	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo unitario (US$)**	**Costo total (US$)**
Arcilla compactada (e = 60 cm)	m3	18337	3,9	70.971
Geodren (8 mm)	m2	27506	2,5	68.765
Tierra Vegetal (e = 40 cm)	m3	12225	3,7	45.165
Captación de biogás				64.043
Sistema de recolección	ha	2	40000,0	64.043
			TOTAL	**248.943**

A continuación se presentan los resultados obtenidos a modo de resumen:

Relleno	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional	3 Rellenos locales
Costos generales					
Implantación de la Obra	149.622	120.721	113.070	226.544	383.413
Infraestructura general	351.876	316.709	307.764	468.955	976.349
Construcción módulos					
Módulo 1	575.525	421.592	369.550	1.075.385	1.366.667
Módulo 2	576.105	423.503	377.941	1.107.442	1.377.548
Módulo 3	578.759	425.423	430.885	1.159.349	1.435.066
Módulo 4	581.426	427.352	440.803	1.171.662	1.449.581
Clausura módulos					
Módulo 1	217.673	159.900	133.801	166.849	511.375
Módulo 2	218.764	160.701	137.180	166.221	516.645
Módulo 3	219.860	161.507	140.644	176.290	522.010
Módulo 4	220.961	162.316	144.195	147.186	527.473
TOTAL Inversión	3.690.572	2.779.723	2.595.833	5.865.882	9.066.128

Tabla 58.- Resumen inversión

2.2.2 Recolección y transporte

Debido a que las distancias de transporte hacia el relleno regional, se incrementan en comparación con la distancias a los rellenos locales, se realizará un análisis económico de los siguientes escenarios:

Relleno regional:

- *Sin estación de transferencia*: Los camiones realizan la recolección en la ciudad y el transporte directo hacia el RSa regional.

- *Con estación de transferencia:* Los camiones realizan la recolección en la ciudad descargan los RSU en la ET y continúan la recolección, mientras que los camiones que reciben la carga en la ET son los encargados de transportarlos hacia el RSa regional.

Relleno local:

- *Sin estación de transferencia:* Los camiones realizan la recolección en la ciudad y el transporte directo hacia el RSa local.

En la Tabla 59 se presentan los valores de las distancias a los RSa locales y al regional

Distancias al RSa (km)		
	Local[4]	Regional
Mercedes	4	16
Fray Bentos	2	50
Dolores	17	19

Tabla 59.- Distancias al RSa

2.2.2.1 Dimensionado de la flota de camiones

Sin estación de transferencia

Para establecer la mano de obra necesaria y dimensionar la capacidad y cantidad de vehículos, se debe determinar el tiempo requerido para llevar a cabo cada tarea:

Tiempo muerto: Incluye todo el tiempo transcurrido entre actividades que no son productivas desde el punto de vista de la recolección, ej. tiempo que le lleva al operario ponerse la ropa de trabajo, etc.

Tiempo de descanso: La jornada de trabajo debe ser interrumpida por un descanso intermedio otorgado durante las ocho horas

Tiempo de descarga: Tiempo transcurrido en la descarga de los RS, tiempo de espera en el lugar, pesaje, etc.

[4]Se supuso que los rellenos locales se ubican en los SDF actuales de las ciudades

Jornada de trabajo	h	8
Tiempo de descanso	h	1
Tiempo de descarga RSa	h	1
Tiempo muerto	h	1
Tiempo máx. recolección y transporte	h	5

Tiempo de recolección y transporte:

El tiempo de transporte por viaje queda definido a partir de la distancia al RSa y considerando una velocidad en ruta de 60 km/h.
El tiempo de recolección es una de las incógnitas, ya que depende de la distancia a recorrer en la recolección y de la capacidad de los camiones.

Para determinar las distancias de recolección se consideró que el recorrido total es la longitud de los ejes de calle de la trama urbana, multiplicado por un coeficiente de 1,5. A su vez, se asumió una velocidad promedio de recolección de 5,5 km/h.

Respecto a la capacidad de los camiones, a efectos de simplificar los cálculos se asume que toda la flota de camiones tiene la misma capacidad. Por otro lado, por los motivos expuestos en la Sección 4.2.2.1. de la Memoria Justificativa, se consideraron dos turnos de recolección para las localidades de Mercedes y Fray Bentos y un turno para la localidad de Dolores.

- *Dimensionado de la flota de recolección*

Una vez definidos los turnos, el procedimiento para el dimensionado de la flota consiste en suponer una capacidad de los camiones, luego se calculan los kilómetros que debe recorrer para llenar el camión suponiendo una distribución uniforme de los residuos en la ciudad:

$$d(km) = \frac{C\ (ton) \cdot D(km/dia)}{R(ton/dia)}$$

Siendo:
d: Kilómetros recorridos necesarios para llenar el camión
C: Capacidad del camión (ton)
D: Distancia total de recolección diaria (km/día)
R: Residuos a recoger en el día (ton/día)

El tiempo de recolección necesario para llenar resulta:

$$t_r(h) = \frac{d(km)}{v(km/h)}$$

Luego la cantidad de viajes que puede realizar el camión por día se calcula como:

$$X = \frac{(J - t_{do} - t_m) \cdot N_t}{t_{dg} + t_r + t_t}$$

Siendo:

X: Número de viajes que puede realizar el camión por día (ida y vuelta)
J: Jornada de trabajo (h)
t_{do}: Tiempo de descanso (h)
t_m: Tiempo muerto (h)
N_t: Cantidad de turnos
t_{dg}: Tiempo de descarga (h)
t_r: Tiempo de recolección (h)
t_t: Tiempo de transporte al RSa ida y vuelta (h)

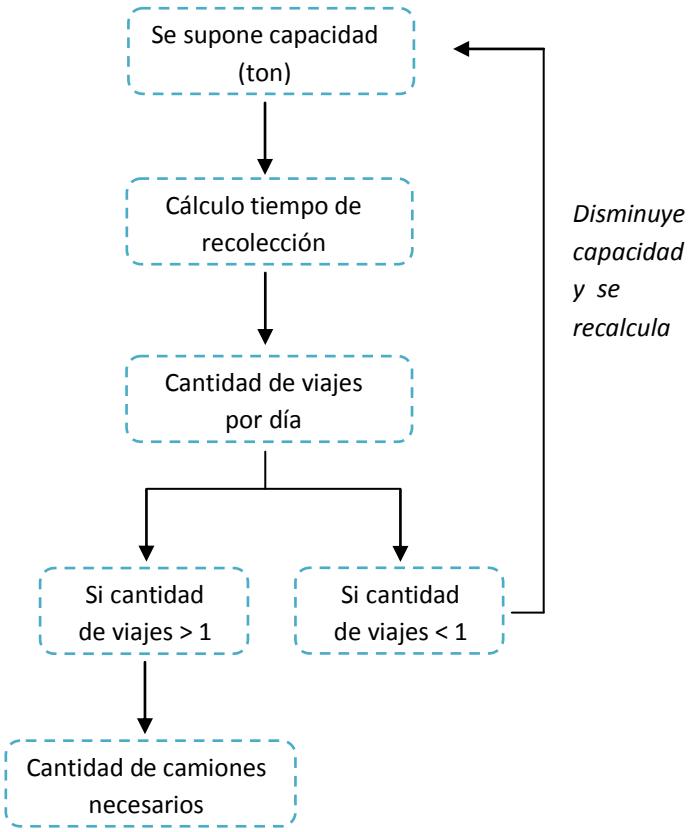
Si X<1, entonces es necesario re-definir la capacidad de los camiones, ya que en un día no se tiene suficiente tiempo para completar el camión e ir y volver al RSa, por lo tanto es necesario disminuir la capacidad de los camiones.

Si X>1, se calcula la cantidad de camiones necesarios para recolectar la cantidad de residuos generada diariamente, como:

$$N_c = R/(C \cdot X)$$

Siendo:
R: Residuos generados en el día (ton/día)
C: Capacidad del camión (ton)
X: Número de viajes que puede realizar el camión por día (ida y vuelta)

El esquema del cálculo de la capacidad y cantidad de camiones se presenta a continuación:



En la Tabla 60 y Tabla 61 se presentan los resultados obtenidos, para el caso del relleno regional y relleno local respectivamente, ambos sin ET.

Relleno regional sin ET			
Localidad	**Mercedes**	**Fray Bentos**	**Dolores**
Distancia a recorrer de recolección (km)	225	153	96
Distancia a recorrer de transporte (km)	16	50	19
Tiempo de viaje - ida y vuelta (h)	0,53	1,67	0,63
Capacidad propuesta (ton)	8	5	3
Tiempo de recolección para llenar el camión (h)	10,4	7,6	3,9
Turnos por día	2	2	1
Cantidad de viajes por día por camión	1	1	1
Cantidad de camiones	4	4	5
km de recolección por día por camión	56	38	19
km de transporte por día por camión	32	100	38

Tabla 60.- Capacidad y cantidad de camiones por localidad, Relleno regional sin ET

Relleno local sin ET			
Localidad	**Mercedes**	**Fray Bentos**	**Dolores**
Distancia a recorrer de recolección (km)	225	153	96
Distancia a recorrer de transporte (km)	4	2	17
Tiempo de viaje - ida y vuelta (h)	0,12	0,07	0,57
Capacidad propuesta (ton)	8	3	3
Tiempo de recolección para llenar el camión (h)	10,4	4,59	3,9
Turnos por día	2	2	1
Cantidad de viajes por día por camión	1	2	1
Cantidad de camiones	4	4	5
km de recolección por día por camión	56	38	19
km de transporte por día por camión	7,2	8	34

Tabla 61.- Capacidad y cantidad de camiones por localidad, Relleno local

Con estación de transferencia

En este escenario se incluye una ET por lo tanto, se tienen dos flotas diferentes, una para la recolección en la ciudad y traslado hacia la ET, y otra para el transporte de los residuos desde la ET hacia el RSa regional.
Se considera que la ET funciona la misma cantidad de turnos que la recolección.

Para dimensionar cada una de las flotas se razona análogamente a la parte anterior (sin estación de transferencia).

En este caso se considera que la ET se encuentra “en la puerta de la ciudad”, y por lo tanto los camiones únicamente tienen que recorrer la distancia de recolección. Por otro lado, se supone un tiempo de descarga en la ET de 1 h.

Jornada de trabajo	h	8
Tiempo de descanso	h	1
Tiempo de descarga la ET	h	1
Tiempo muerto	h	1
Tiempo máx. de recolección	h	5

En este caso, la cantidad de viajes que puede realizar un camión por día se calcula como:

$$X = \frac{(J - t_{do} - t_m) \cdot N_t}{t_{dg} + t_r}$$

Siendo:
X: Número de viajes que puede realizar el camión por día (ida y vuelta)
J: Jornada de trabajo (h)
t_{do}: Tiempo de descanso (h)
t_m: Tiempo muerto (h)
N_t: Cantidad de turnos
t_{dg}: Tiempo de descarga en la ET (h)
t_r: Tiempo de recolección (h)

La flota de transporte no realiza la recolección de los residuos, por lo tanto los camiones únicamente recorren la distancia de transporte. A demás de considerar el tiempo de descarga en el RSa, se considera un tiempo de carga de los RS en la ET.

Jornada de trabajo	h	8
Tiempo de descanso	h	1
Tiempo de carga y descarga ET	h	1,5
Tiempo muerto	h	1
Tiempo máx. de transporte	h	4

En este caso, la cantidad de viajes que puede realizar un camión por día se calcula como:

$$X = \frac{(J - t_{do} - t_m) \cdot N_t}{t_{dg} + t_t}$$

Siendo:
X: Número de viajes que puede realizar el camión por día (ida y vuelta)
J: Jornada de trabajo (h)
t_{do}: Tiempo de descanso (h)
t_m: Tiempo muerto (h)
N_t: Cantidad de turnos
t_{dg}: Tiempo de carga en la ET y descarga en el RSa (h)
t_t: Tiempo de transporte al RSa ida y vuelta (h)

En la Tabla 62 se presentan los resultados obtenidos para la flota de recolección y la de transporte, para el caso del relleno regional con ET:

Relleno regional con ET			
Localidad	**Mercedes**	**Fray Bentos**	**Dolores**
Flota Recolección			
Distancia a recorrer (km)	225	153	96
Capacidad propuesta	8	3	3
Cantidad de viajes por día por camión	1	2	1
Cantidad de camiones	4	4	5
km de recolección por día por camión	56	38	19
Flota Transferencia			
Distancia a recorrer (km)	16	50	19
Tiempo de viaje - ida y vuelta (h)	0,53	1,67	0,63
Capacidad propuesta	8	8	8
Cantidad de viajes por día por camión	4	2	2
Cantidad de camiones	1	1	1
km de transporte por día por camión	128	300	76

Tabla 62.- Capacidad y cantidad de camiones por localidad, Relleno regional con ET

2.2.2.2 Costos de inversión

Flota de camiones:

Tanto los camiones de recolección como los de transporte de la ET, son compactadores cerrados. En particular se seleccionó el modelo CS6 de la marca SCORSA, el cual se monta sobre un chasis de capacidad de carga 17 toneladas y 220 HP.

El costo del chasis, según precios de referencia en el mercado local es de US$70.000. Por otro lado, el costo de los equipos recolectores varía según su capacidad; para 16 m^3es de aproximadamente US$45.000,

Los precios considerados de los camiones en función de su capacidad fueron los siguientes:

Camiones recolectores compactadores		
Capacidad (ton)	Volumen (m^3)	Precio (US$)
8	16	115.000,00
5	10	112.000,00
3	6	111.000,00

Tabla 63.- Camiones compactadores

Estación de transferencia

En la Tabla 64se presentan los costos considerados para la inversión de la estación de transferencia:

Inversión ET				
Rubro	Unidad	Metraje	Costo unitario	Costo total
Compra terreno	m2	2500	100	250.000
Caseta de control	unidad	1	500	500
Estacionamiento y patio de maniobras	m2	2000	30	60.000
Cerco perimetral	m	200	75	15.000
Baño y oficina	m2	30	750	22.500
			TOTAL (US$)	348.000,0

Tabla 64.- Inversión, estación de transferencia

2.2.2.3 Operación y Mantenimiento

Recursos humanos

Los recursos humanos considerados son los choferes de los camiones y ayudantes de los choferes. Los salarios considerados fueron los siguientes:

Salarios Recursos humanos (US$/mes)	
Chofer	1553
Ayudante	1000

Tabla 65.- Salarios recursos humanos

Combustible y mantenimiento

Estos costos consideran el combustible, los neumáticos y lubricantes los cuales aumentan linealmente en función a los kilómetros recorridos. A continuación se presenta la Tabla 66, en la cual se muestran los costos tenidos en cuenta.

Costos por km		
Combustible	$U/l	42,5
Neumáticos	$U/neu	2205
Lubricantes	$U/veh	300

Tabla 66.- Costos por km

Considerando a su vez los siguientes rendimientos:

Rendimientos		
Combustible	km/l	1,8
Neumáticos	neu/km-veh	0,0001
Lubricantes	lt/km-veh	0,0048

Tabla 67.- Rendimientos

Resulta un valor total de 0,8 US$/km

Amortización de la flota

La amortización de la flota se realiza considerando una vida útil de los camiones de 10 años.

Operación y Mantenimiento ET

Los costos por operación y mantenimiento diarios de la ET en función de los turnos de funcionamiento se presentan en la Tabla 68

Operación y mantenimiento ET 2 turnos			
Recursos humanos	Cantidad	Salario mensual (US$)	Costo total (US$/mes)
Sereno/ Guardia de seguridad	3	1000	3000
Administrativo/ Jefe de la ET	2	1000	2000
Gastos fijos		333	333
		TOTAL (US$)	5333
Operación y mantenimiento ET 1 turno			
Recursos humanos	Cantidad	Salario mensual (US$)	Costo total (US$/mes)
Sereno/ Guardia de seguridad	3	1000	3000
Administrativo/ Jefe de la ET	1	1000	1000
Gastos fijos		333	333
		TOTAL (US$)	4333

Tabla 68.- Costos operación y mantenimiento, ET

2.2.3 Operación y mantenimiento del RSa

Los escenarios planteados de las diferentes alternativas de operación y mantenimiento son los siguientes:

- 2 turnos diarios mecanizados
- 1 turno diario mecanizado
- 1 turno diario semi mecanizado

2.2.3.1 Costos de operación y mantenimiento del RSa

Los costos de operación y mantenimiento comprenden la inversión en la maquinaria y vehículos, salarios de recursos humanos, combustible y amortización de la maquinaria, mantenimiento de la caminería, monitoreo ambiental y otros costos fijos.

Inversión

Los costos de inversión dependen de la maquinaria y vehículos seleccionados en cada caso, los precios para la compra de los mismos fueron seleccionados teniendo como referencia precios usuales en el mercado local:

Maquinaria	
	Costo unitario (US$)
Compactadora de Residuos 816	380.000
Cargador sobre orugas 953	250.000
Pala cargadora	150.000
Camión	100.000

Tabla 69.- Costo, maquinaria y vehículos

Para el cálculo la cantidad de maquinaria, se supuso una capacidad de procesamiento de residuos de 10 y 5 toneladas por hora para las alternativas mecanizada y semi-mecanizadas respectivamente. A partir de dichas capacidades, se calculó el uso diario mínimo necesario para cada escala del relleno .Luego, las horas disponibles de uso de la maquinaria se obtuvieron considerando, una hora de tiempo muerto y una hora de descanso dentro de la jornada de trabajo.

La cantidad de maquinaria se determinó imponiendo como condición, que las horas de uso diario mínimo no superen las horas disponibles.

Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional
2 turnos mecanizados				
Uso mínimo de la maquinaria (h/día)	3,1	1,8	1,2	6,2
Uso disponible (h/día)	12,0	12,0	12,0	12,0
Compactadora de residuos (cantidad)	1	1	1	1
1 turno mecanizado				
Uso mínimo de la maquinaria (h/día)	3,1	1,8	1,2	6,2
Uso disponible (h/día)	6,0	6,0	6,0	6,0
Compactadora de residuos (cantidad)	1	1	1	2
1 turno semi mecanizado				
Uso mínimo de la maquinaria (h/día)	6,2	3,6	2,4	12,3
Uso disponible (h/día)	6,0	6,0	6,0	6,0
Cargador sobre orugas (cantidad)	2	1	1	3

Tabla 70.- Cantidad maquinaria

Salarios:

Los salarios de los recursos humanos considerados se presentan en la Tabla 71.La cantidad de personal seleccionado para cada cargo se detalla en la Memoria Justificativa Sección 4.2.3.2. en función del número de turnos:

Recursos humanos	
Cargo	**Sueldo mensual ($)**
Chofer Compactadora de Residuos	42.000
Chofer Pala Cargadora	42.000
Chofer Cargador de cadena	42.000
Chofer de Camión	25.000
Administrativo	30.000
Coordinador/jefe del RS	60.000
TécnicoHidráulico-Ambiental	60.000
Peones	26.000
Guardia	30.000

Tabla 71.- Salarios, recursos humanos

Combustible y amortización:

Respecto a las amortizaciones de la maquinaria, la Compactadora de Residuos, el Cargador de Cadenas y la Pala cargadora, se amortizan al 5% anual, ya que se considera una vida útil de 20 años, el camión se amortiza al 10% anual, considerando una vida útil de 10 años. Dicho cálculo es realizado de la misma forma para cada una de las localidades, ya que se parte del mismo costo unitario para cada equipo y se considera la misma vida útil en cada relleno.

Amortización anual		
Equipo	Vida útil	Costo anual (US$/año)
Cargador de cadena 953	20	12.500
Compactadora de Residuos 816	20	19.000
Pala Cargadora	20	7.500
Camión	10	10.000

Tabla 72.- Cálculo de la amortización por equipo

El camión será utilizado principalmente para el transporte del material correspondiente a la tapada diaria, por lo tanto es necesario conocer el avance diario de las celdas para determinar el volumen a transportar y el número de viajes que deberá realizar.

Para el cálculo del avance diario, se definió la geometría de las celdas en base a recomendaciones[5], optándose por una altura de 2 m y ancho de 6 m con talud 1V:3H.
Luego, el volumen de arcilla necesario para la tapada diaria, se calculó como el área superficial de la celda por un espesor de 0,2 m y considerando un coeficiente de esponjamiento de 1,4.

[5] Fuente: Gestión Integral de Residuos Sólidos- George Tchobanoglus

Material para la cubrición diaria				
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional
Volumen compactado (m^3)	43,9	25,6	17,4	88,1
Avance diario (m)	3,7	2,1	1,5	7,3
Celda diaria				
Área transversal frontal (m^2)	23,2	13,5	9,2	46,4
Área transversal lateral (m^2)	12,0	12,0	12,0	12,0
Área superficial (m^2)	22,0	12,8	8,7	44,0
Área total (m^2)	57,1	38,2	29,9	102,5
Volumen en banco (m^3)	11,4	7,6	6,0	20,5
Volumen transporte (m^3)	16,0	10,7	8,4	28,7

Tabla 73.- Cálculo del avance y del volumen de material necesario para la cubrición diaria de los residuos por localidad

El grado de utilización del camión se calculó suponiendo camiones de 10 m^3 de capacidad y que el material utilizado para la cubrición es el obtenido de la excavación de las celdas, a los efectos de determinar el uso del camión se supuso que por viaje recorre una distancia máxima de 1 km.

Camión de transporte de material				
Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional
Viajes por día	4	4	2	6
Uso del camión (km/mes)	96	96	48	144

Tabla 74.- Cálculo de utilización de los camiones

El consumo de gasoil de la maquinaria y camión se determina a partir del grado de utilización y los rendimientos en consumo de combustible, detallado en la Tabla 75. En particular, los rendimientos de la maquinaria se obtuvieron del Manual de Rendimientos CATERPILLEAR, en función del tipo de trabajo que realiza; en todos los casos se consideró una aplicación media del trabajo.

Rendimiento Gasoil		
Equipo	Unidad	Cantidad
Compactadora de Residuos	L/hora	28
Pala Cargadora	L/hora	12
Camión	L/km	2,5
Cargador de cadena 953	L/hora	21,5

Tabla 75.- Rendimientos combustible

Luego el precio asumido del gasoil es de 1.64 US$/L (fuente de referencia: precios de venta ANCAP).
Además se asume que el costo por mantenimiento de los equipos como el 50% del costo por consumo de combustible anual.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional
Costo anual de combustible y mantenimiento (US$/mes)				
2 turnos mecanizados	94.267	57.777	38.149	121.581
1 turno mecanizado	94.267	57.777	38.149	185.346
1 turno semi mecanizado	100.806	61.579	40.744	574.094
Costo total de la maquinaria + amortización (US$/mes)				
2 turnos mecanizados	130.767	94.277	74.649	221.846
1 turno mecanizado	130.767	94.277	74.649	240.846
1 turno semi mecanizado	135.806	84.079	63.244	621.594

Tabla 76.- Costo de la maquinaria, por localidad

Mantenimiento de la caminería

El mantenimiento de la caminería se realiza 12 veces al año, y según los rendimientos considerados para cada maquinaria son necesarios dos días de trabajo para colocar, tender y compactar la tosca. A su vez se incluyó una cuadrilla de tres peones que acompañen las tareas a realizar.

Mantenimiento de la caminería					
Rubro	Cantidad	Unidad rendimiento	Rendimiento	Veces x año (días)	Costo Unit. (US$/u)
Moto Niveladora	1	m/día	400	12	650
Rodillo Liso	1	m3/día	107	12	450
Peones	3	-	-	12	39

Tabla 77.- Mantenimiento de caminería

Además se determina el volumen de tosca a adquirir para cada localidad en función de la longitud de la caminería, la cual se supone que es igual a 5 veces el lado del módulo, ver Sección 2.2.1.1. El precio de compra de tosca puesta en el lugar es de 19 US$/m3.

Se obtiene como resultado entre el material y los equipos para el mantenimiento los siguientes valores:

Localidad	Mercedes	Fray Bentos	Dolores	Regional
Costo total anual (US$/año)	84.909	75.741	73.861	121.581

Tabla 78.- Costos mantenimiento de la caminería

Monitoreo ambiental

Se consideran los costos de extracción de muestras y realización de análisis de las aguas subterráneas y del efluente a la salida al tratamiento previsto.

Se estiman, para cada relleno,18 ensayos anuales, correspondientes a 1 ensayo mensual en planta de tratamiento y cada dos meses en los pozos de monitoreo.

Monitoreo ambiental			
Rubro	Costo unitario ($)	Cantidad	Costo total (US$)/año
Ensayos	3.000	18	1.800
	TOTAL		1.800

Tabla 79.- Costo del monitoreo ambiental

Otros

Se estiman un costo anual de 14.400 US$/año por gastos fijos como ser ANTEL, UTE, OSE, herramientas, artículos de limpieza, etc.

Resultados:

	Operación y Mantenimiento (US$/año)					
	2 turnos mecanizados					
	Mano de obra	Maquinaria	Caminería	Monitoreo Ambiental	Otros	Total
Mercedes	273.600	130.767	84.909	1.800	14.400	505.476
Fray Bentos	273.600	94.277	75.741	1.800	14.400	459.818
Dolores	273.600	74.649	73.861	1.800	14.400	438.310
Regional	273.600	221.846	121.581	1.800	14.400	633.227
	1 turno mecanizado					
	Mano de obra	Maquinaria	Caminería	Monitoreo Ambiental	Otros	Total
Mercedes	216.000	130.767	84.909	1.800	7.200	440.676
Fray Bentos	216.000	94.277	75.741	1.800	7.200	395.018
Dolores	216.000	74.649	73.861	1.800	7.200	373.510
Regional	216.000	240.846	121.581	1.800	7.200	587.427
	1 turno semi mecanizado					
	Mano de obra	Maquinaria	Caminería	Monitoreo Ambiental	Otros	Total
Mercedes	160.000	135.806	73.861	1.800	7.200	378.667
Fray Bentos	160.000	84.079	75.741	1.800	7.200	328.820
Dolores	160.000	63.244	84.909	1.800	7.200	317.153
Regional	160.000	621.594	121.581	1.800	7.200	912.175

Tabla 80.- Costos operación y mantenimiento según turnos y grado de mecanización

Con el fin de poder representar los costos de operación y mantenimiento para la modalidad seleccionada en cada localidad, ver Sección 4.2.3.4 de la Memoria Justificativa, a lo largo de la vida útil del relleno. Se calculó el VAN durante los 20 años, con una tasa de descuento del 10 % y una inflación anual del 8 %, considerando una primera inversión en maquinaria al inicio de la operación y una reinversión en camiones a los 10 años de funcionamiento. Luego para obtener los costos por tonelada se dividió la VAN entre las toneladas totales de residuos dispuestos durante la vida útil del relleno.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

	Costo total OyM (US$)				
2 turnos mecanizado	11.344.993	10.386.176		13.297.760	28.841.387
1 turno semi mecanizado			7.110.218		

Tabla 81.- VAN OyM durante el período analizado (20 años)

4- Anexos

a. Resultados de los modelos de generación de biogás

Estimación Estequiométrica			
Año	**Caudal Biogás de la fracción lentamente degradable (m^3/año)**	**Caudal Biogás de la fracción rápidamente degradable (m^3/año)**	**Caudal Biogás Total (m^3/año)**
2015	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2016	2,44E+04	3,04E+06	3,06E+06
2017	7,33E+04	5,33E+06	5,40E+06
2018	1,47E+05	6,86E+06	7,00E+06
2019	2,45E+05	7,63E+06	7,88E+06
2020	3,68E+05	7,65E+06	8,02E+06
2021	4,78E+05	7,67E+06	8,15E+06
2022	5,77E+05	7,68E+06	8,26E+06
2023	6,63E+05	7,70E+06	8,36E+06
2024	7,37E+05	7,71E+06	8,45E+06
2025	7,99E+05	7,73E+06	8,53E+06
2026	8,48E+05	7,74E+06	8,59E+06
2027	8,86E+05	7,76E+06	8,65E+06
2028	9,11E+05	7,78E+06	8,69E+06
2029	9,24E+05	7,80E+06	8,72E+06
2030	9,25E+05	7,82E+06	8,74E+06
2031	9,26E+05	7,84E+06	8,76E+06
2032	9,27E+05	7,85E+06	8,78E+06
2033	9,28E+05	7,87E+06	8,80E+06
2034	9,28E+05	7,89E+06	8,82E+06
2035	9,29E+05	7,91E+06	8,83E+06
2036	9,30E+05	7,92E+06	8,85E+06
2037	9,05E+05	4,76E+06	5,66E+06
2038	8,55E+05	2,38E+06	3,24E+06
2039	7,79E+05	7,94E+05	1,57E+06
2040	6,77E+05	0,00E+00	6,77E+05
2041	5,50E+05	0,00E+00	5,50E+05
2042	4,40E+05	0,00E+00	4,40E+05
2043	3,42E+05	0,00E+00	3,42E+05
2044	2,56E+05	0,00E+00	2,56E+05
2045	1,83E+05	0,00E+00	1,83E+05
2046	1,22E+05	0,00E+00	1,22E+05
2047	7,33E+04	0,00E+00	7,33E+04
2048	3,66E+04	0,00E+00	3,66E+04
2049	1,22E+04	0,00E+00	1,22E+04
2050	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Modelo Primer Orden: LandGEM			
Año	**Total residuos: Mi (Mg/año)**	**Biogás (m^3/año)**	**Metano (m^3/año)**
2015	2,07E+04	0,00E+00	0,00E+00
2016	2,07E+04	2,02E+05	1,01E+05
2017	2,08E+04	3,95E+05	1,98E+05
2018	2,08E+04	5,79E+05	2,90E+05
2019	2,09E+04	7,54E+05	3,77E+05
2020	2,09E+04	9,22E+05	4,61E+05
2021	2,10E+04	1,08E+06	5,41E+05
2022	2,10E+04	1,23E+06	6,17E+05
2023	2,10E+04	1,38E+06	6,89E+05
2024	2,11E+04	1,52E+06	7,59E+05
2025	2,11E+04	1,65E+06	8,25E+05
2026	2,12E+04	1,78E+06	8,88E+05
2027	2,12E+04	1,90E+06	9,48E+05
2028	2,13E+04	2,01E+06	1,01E+06
2029	2,13E+04	2,12E+06	1,06E+06
2030	2,14E+04	2,23E+06	1,11E+06
2031	2,14E+04	2,33E+06	1,16E+06
2032	2,15E+04	2,42E+06	1,21E+06
2033	2,15E+04	2,51E+06	1,26E+06
2034	2,16E+04	2,60E+06	1,30E+06
2035	2,16E+04	2,69E+06	1,34E+06
2036	0,00E+00	2,77E+06	1,38E+06
2037	0,00E+00	2,63E+06	1,32E+06
2038	0,00E+00	2,50E+06	1,25E+06
2039	0,00E+00	2,38E+06	1,19E+06
2040	0,00E+00	2,27E+06	1,13E+06
2041	0,00E+00	2,15E+06	1,08E+06
2042	0,00E+00	2,05E+06	1,02E+06
2043	0,00E+00	1,95E+06	9,75E+05
2044	0,00E+00	1,85E+06	9,27E+05
2045	0,00E+00	1,76E+06	8,82E+05
2046	0,00E+00	1,68E+06	8,39E+05
2047	0,00E+00	1,60E+06	7,98E+05
2048	0,00E+00	1,52E+06	7,59E+05
2049	0,00E+00	1,44E+06	7,22E+05
2050	0,00E+00	1,37E+06	6,87E+05

Modelo Primer Orden: General			
Año	**Total Residuos: Mi (ton/año)**	**Biogás (m^3/año)**	**Metano (m^3/año)**
2015	2,07E+04	1,97E+05	9,83E+04
2016	2,07E+04	3,84E+05	1,92E+05
2017	2,08E+04	5,63E+05	2,82E+05
2018	2,08E+04	7,34E+05	3,67E+05
2019	2,09E+04	8,97E+05	4,48E+05
2020	2,09E+04	1,05E+06	5,26E+05
2021	2,10E+04	1,20E+06	6,00E+05
2022	2,10E+04	1,34E+06	6,71E+05
2023	2,10E+04	1,48E+06	7,38E+05
2024	2,11E+04	1,60E+06	8,02E+05
2025	2,11E+04	1,73E+06	8,63E+05
2026	2,12E+04	1,84E+06	9,22E+05
2027	2,12E+04	1,96E+06	9,78E+05
2028	2,13E+04	2,06E+06	1,03E+06
2029	2,13E+04	2,17E+06	1,08E+06
2030	2,14E+04	2,26E+06	1,13E+06
2031	2,14E+04	2,36E+06	1,18E+06
2032	2,15E+04	2,45E+06	1,22E+06
2033	2,15E+04	2,53E+06	1,27E+06
2034	2,16E+04	2,61E+06	1,31E+06
2035	2,16E+04	2,69E+06	1,35E+06
2036	0,00E+00	2,56E+06	1,28E+06
2037	0,00E+00	2,44E+06	1,22E+06
2038	0,00E+00	2,32E+06	1,16E+06
2039	0,00E+00	2,20E+06	1,10E+06
2040	0,00E+00	2,10E+06	1,05E+06
2041	0,00E+00	1,99E+06	9,97E+05
2042	0,00E+00	1,90E+06	9,48E+05
2043	0,00E+00	1,80E+06	9,02E+05
2044	0,00E+00	1,72E+06	8,58E+05
2045	0,00E+00	1,63E+06	8,16E+05
2046	0,00E+00	1,55E+06	7,76E+05
2047	0,00E+00	1,48E+06	7,38E+05
2048	0,00E+00	1,40E+06	7,02E+05
2049	0,00E+00	1,34E+06	6,68E+05
2050	0,00E+00	1,27E+06	6,36E+05

Modelo Primer Orden - Multifase: Centroamericano			
Año	**Total residuos: Mi (Mg/año)**	**Biogás (m^3/año)**	**Metano (m^3/año)**
2015	2,07E+04	0,00E+00	0,00E+00
2016	2,07E+04	4,08E+05	2,04E+05
2017	2,08E+04	7,48E+05	3,74E+05
2018	2,08E+04	1,03E+06	5,16E+05
2019	2,09E+04	1,27E+06	6,36E+05
2020	2,09E+04	1,48E+06	7,39E+05
2021	2,10E+04	1,65E+06	8,26E+05
2022	2,10E+04	1,80E+06	9,02E+05
2023	2,10E+04	1,94E+06	9,68E+05
2024	2,11E+04	2,05E+06	1,03E+06
2025	2,11E+04	2,15E+06	1,08E+06
2026	2,12E+04	2,24E+06	1,12E+06
2027	2,12E+04	2,33E+06	1,16E+06
2028	2,13E+04	2,40E+06	1,20E+06
2029	2,13E+04	2,47E+06	1,24E+06
2030	2,14E+04	2,54E+06	1,27E+06
2031	2,14E+04	2,60E+06	1,30E+06
2032	2,15E+04	2,65E+06	1,33E+06
2033	2,15E+04	2,70E+06	1,35E+06
2034	2,16E+04	2,75E+06	1,38E+06
2035	2,16E+04	2,80E+06	1,40E+06
2036	0,00E+00	2,84E+06	1,42E+06
2037	0,00E+00	2,45E+06	1,23E+06
2038	0,00E+00	2,14E+06	1,07E+06
2039	0,00E+00	1,87E+06	9,37E+05
2040	0,00E+00	1,66E+06	8,29E+05
2041	0,00E+00	1,48E+06	7,39E+05
2042	0,00E+00	1,33E+06	6,64E+05
2043	0,00E+00	1,20E+06	6,00E+05
2044	0,00E+00	1,09E+06	5,46E+05
2045	0,00E+00	1,00E+06	5,00E+05
2046	0,00E+00	9,19E+05	4,60E+05
2047	0,00E+00	8,50E+05	4,25E+05
2048	0,00E+00	7,89E+05	3,94E+05
2049	0,00E+00	7,34E+05	3,67E+05
2050	0,00E+00	6,86E+05	3,43E+05

Modelo Primer Orden: IPCC			
Año	**Total residuos: Mi (Mg/año)**	**Biogás (m^3/año)**	**Metano (m^3/año)**
2015	2,07E+04	0,00E+00	0,00E+00
2016	2,07E+04	1,63E+05	8,15E+04
2017	2,08E+04	3,18E+05	1,59E+05
2018	2,08E+04	4,67E+05	2,33E+05
2019	2,09E+04	6,08E+05	3,04E+05
2020	2,09E+04	7,43E+05	3,71E+05
2021	2,10E+04	8,72E+05	4,36E+05
2022	2,10E+04	9,94E+05	4,97E+05
2023	2,10E+04	1,11E+06	5,56E+05
2024	2,11E+04	1,22E+06	6,11E+05
2025	2,11E+04	1,33E+06	6,65E+05
2026	2,12E+04	1,43E+06	7,15E+05
2027	2,12E+04	1,53E+06	7,64E+05
2028	2,13E+04	1,62E+06	8,10E+05
2029	2,13E+04	1,71E+06	8,55E+05
2030	2,14E+04	1,79E+06	8,97E+05
2031	2,14E+04	1,88E+06	9,38E+05
2032	2,15E+04	1,95E+06	9,76E+05
2033	2,15E+04	2,03E+06	1,01E+06
2034	2,16E+04	2,10E+06	1,05E+06
2035	2,16E+04	2,17E+06	1,08E+06
2036	0,00E+00	2,23E+06	1,11E+06
2037	0,00E+00	2,12E+06	1,06E+06
2038	0,00E+00	2,02E+06	1,01E+06
2039	0,00E+00	1,92E+06	9,60E+05
2040	0,00E+00	1,83E+06	9,13E+05
2041	0,00E+00	1,74E+06	8,68E+05
2042	0,00E+00	1,65E+06	8,26E+05
2043	0,00E+00	1,57E+06	7,86E+05
2044	0,00E+00	1,49E+06	7,47E+05
2045	0,00E+00	1,42E+06	7,11E+05
2046	0,00E+00	1,35E+06	6,76E+05
2047	0,00E+00	1,29E+06	6,43E+05
2048	0,00E+00	1,22E+06	6,12E+05
2049	0,00E+00	1,16E+06	5,82E+05
2050	0,00E+00	1,11E+06	5,54E+05

Modelo Primer Orden - Multifase: IPCC			
Año	**Total residuos: Mi (Mg/año)**	**Biogás (m^3/año)**	**Metano (m^3/año)**
2015	2,07E+04	0,00E+00	0,00E+00
2016	2,07E+04	2,27E+05	1,13E+05
2017	2,08E+04	4,34E+05	2,17E+05
2018	2,08E+04	6,23E+05	3,11E+05
2019	2,09E+04	7,96E+05	3,98E+05
2020	2,09E+04	9,56E+05	4,78E+05
2021	2,10E+04	1,10E+06	5,51E+05
2022	2,10E+04	1,24E+06	6,19E+05
2023	2,10E+04	1,37E+06	6,83E+05
2024	2,11E+04	1,48E+06	7,41E+05
2025	2,11E+04	1,59E+06	7,96E+05
2026	2,12E+04	1,69E+06	8,47E+05
2027	2,12E+04	1,79E+06	8,95E+05
2028	2,13E+04	1,88E+06	9,40E+05
2029	2,13E+04	1,96E+06	9,82E+05
2030	2,14E+04	2,04E+06	1,02E+06
2031	2,14E+04	2,12E+06	1,06E+06
2032	2,15E+04	2,19E+06	1,10E+06
2033	2,15E+04	2,26E+06	1,13E+06
2034	2,16E+04	2,32E+06	1,16E+06
2035	2,16E+04	2,38E+06	1,19E+06
2036	0,00E+00	2,44E+06	1,22E+06
2037	0,00E+00	2,26E+06	1,13E+06
2038	0,00E+00	2,09E+06	1,05E+06
2039	0,00E+00	1,95E+06	9,73E+05
2040	0,00E+00	1,81E+06	9,06E+05
2041	0,00E+00	1,69E+06	8,45E+05
2042	0,00E+00	1,58E+06	7,90E+05
2043	0,00E+00	1,48E+06	7,39E+05
2044	0,00E+00	1,39E+06	6,93E+05
2045	0,00E+00	1,30E+06	6,51E+05
2046	0,00E+00	1,22E+06	6,12E+05
2047	0,00E+00	1,15E+06	5,76E+05
2048	0,00E+00	1,09E+06	5,43E+05
2049	0,00E+00	1,02E+06	5,12E+05
2050	0,00E+00	9,67E+05	4,83E+05

Modelo Orden Cero: IPCC			
Año	**RSU_T (Gg/año)**	**Biogás (m^3/año)**	**Metano (m^3/año)**
2015	2,07E+01	5,03E+06	2,52E+06
2016	2,07E+01	5,05E+06	2,52E+06
2017	2,08E+01	5,06E+06	2,53E+06
2018	2,08E+01	5,07E+06	2,53E+06
2019	2,09E+01	5,08E+06	2,54E+06
2020	2,09E+01	5,09E+06	2,55E+06
2021	2,10E+01	5,10E+06	2,55E+06
2022	2,10E+01	5,11E+06	2,56E+06
2023	2,10E+01	5,12E+06	2,56E+06
2024	2,11E+01	5,13E+06	2,56E+06
2025	2,11E+01	5,14E+06	2,57E+06
2026	2,12E+01	5,16E+06	2,58E+06
2027	2,12E+01	5,17E+06	2,58E+06
2028	2,13E+01	5,18E+06	2,59E+06
2029	2,13E+01	5,19E+06	2,60E+06
2030	2,14E+01	5,20E+06	2,60E+06
2031	2,14E+01	5,21E+06	2,61E+06
2032	2,15E+01	5,23E+06	2,61E+06
2033	2,15E+01	5,24E+06	2,62E+06
2034	2,16E+01	5,25E+06	2,62E+06
2035	2,16E+01	5,26E+06	2,63E+06

Modelo Orden Cero: EPA			
Año	**Total Residuos (ton/año)**	**Biogás (m^3/año)**	**Metano (m^3/año)**
2015	2,07E+04	1,17E+05	5,86E+04
2016	2,07E+04	1,17E+05	5,87E+04
2017	2,08E+04	1,18E+05	5,88E+04
2018	2,08E+04	1,18E+05	5,90E+04
2019	2,09E+04	1,18E+05	5,91E+04
2020	2,09E+04	1,18E+05	5,92E+04
2021	2,10E+04	1,19E+05	5,94E+04
2022	2,10E+04	1,19E+05	5,95E+04
2023	2,10E+04	1,19E+05	5,96E+04
2024	2,11E+04	1,19E+05	5,97E+04
2025	2,11E+04	1,20E+05	5,98E+04
2026	2,12E+04	1,20E+05	6,00E+04
2027	2,12E+04	1,20E+05	6,01E+04
2028	2,13E+04	1,21E+05	6,03E+04
2029	2,13E+04	1,21E+05	6,04E+04
2030	2,14E+04	1,21E+05	6,05E+04
2031	2,14E+04	1,21E+05	6,07E+04
2032	2,15E+04	1,22E+05	6,08E+04
2033	2,15E+04	1,22E+05	6,09E+04
2034	2,16E+04	1,22E+05	6,11E+04
2035	2,16E+04	1,22E+05	6,12E+04

Modelo Orden Cero: SWANNA			
Año	**Total Residuos (ton/año)**	**Biogás (m^3/año)**	**Metano (m^3/año)**
2015	2,07E+04	3,18E+05	1,59E+05
2016	2,07E+04	6,37E+05	3,19E+05
2017	2,08E+04	9,57E+05	4,78E+05
2018	2,08E+04	1,28E+06	6,38E+05
2019	2,09E+04	1,60E+06	7,99E+05
2020	2,09E+04	1,92E+06	9,60E+05
2021	2,10E+04	2,24E+06	1,12E+06
2022	2,10E+04	2,57E+06	1,28E+06
2023	2,10E+04	2,89E+06	1,44E+06
2024	2,11E+04	3,21E+06	1,61E+06
2025	2,11E+04	3,54E+06	1,77E+06
2026	2,12E+04	3,86E+06	1,93E+06
2027	2,12E+04	4,19E+06	2,10E+06
2028	2,13E+04	4,20E+06	2,10E+06
2029	2,13E+04	4,21E+06	2,10E+06
2030	2,14E+04	4,22E+06	2,11E+06
2031	2,14E+04	4,23E+06	2,11E+06
2032	2,15E+04	4,24E+06	2,12E+06
2033	2,15E+04	4,25E+06	2,12E+06
2034	2,16E+04	4,26E+06	2,13E+06
2035	2,16E+04	4,26E+06	2,13E+06
2036	0,00E+00	3,94E+06	1,97E+06
2037	0,00E+00	3,62E+06	1,81E+06
2038	0,00E+00	3,29E+06	1,65E+06
2039	0,00E+00	2,97E+06	1,48E+06
2040	0,00E+00	2,64E+06	1,32E+06
2041	0,00E+00	2,31E+06	1,16E+06
2042	0,00E+00	1,98E+06	9,92E+05
2043	0,00E+00	1,66E+06	8,28E+05
2044	0,00E+00	1,33E+06	6,63E+05
2045	0,00E+00	9,95E+05	4,98E+05
2046	0,00E+00	6,64E+05	3,32E+05
2047	0,00E+00	3,33E+05	1,66E+05

b. Regionalización preliminar

i. Determinación de la distancia máxima a recorrer por localidad

Departamento	Localidad	Personas	Tasa Generación (kg/hab/día)	Residuos a disponer (ton/día)	Costo por disposición (US$/mes)	Número de viajes por día (ida y vuelta)	Cantidad de Camiones	Costo Camión (US$/mes)	Máxima distancia rentable (km/mes)	Máxima distancia rentable (km)	Corrección para 4 h de transporte a 75 km/h
Artigas	Artigas	40.657	0,727	29,6	14.188	3	2	3.107	2308,5	77,0	75,0
	Bella Unión	12.200	0,697	8,5	4.082	1	1	1.553	1580,2	52,7	52,7
Cerro Largo	Melo	51.830	0,757	39,2	18.833	4	2	3.107	2457,2	81,9	75,0
	Río Branco	14.604	0,697	10,2	4.886	2	1	1.553	1041,4	34,7	34,7
Colonia	Colonia del Sacramento	26.231	0,727	19,1	9.154	2	1	1.553	2375,1	79,2	75,0
	Carmelo	18.041	0,697	12,6	6.036	2	1	1.553	1400,8	46,7	46,7
	Juan Lacaze	12.816	0,697	8,9	4.288	1	1	1.553	1709,0	57,0	57,0
	Nueva Helvecia	10.630	0,697	7,4	3.556	1	1	1.553	1251,9	41,7	41,7
	Rosario	10.085	0,697	7,0	3.374	1	1	1.553	1137,9	37,9	37,9
Durazno	Durazno	34.368	0,727	25,0	11.993	3	2	3.107	1851,3	61,7	61,7
Flores	Trinidad	21.429	0,727	15,6	7.478	2	1	1.553	1851,4	61,7	61,7
Florida	Florida	33.639	0,727	24,5	11.739	3	2	3.107	1798,3	59,9	59,9
Lavalleja	Minas	38.446	0,727	28,0	13.416	3	2	3.107	2147,8	71,6	71,6
Maldonado	Maldonado	62.590	0,757	47,4	22.743	5	3	4.660	2260,3	75,3	75,0
	San Carlos	27.471	0,727	20,0	9.586	2	1	1.553	2510,3	83,7	75,0
Paysandú	Paysandú	76.412	0,757	57,8	27.765	6	3	4.660	2406,8	80,2	75,0
Río Negro	Fray Bentos	24.406	0,727	17,7	8.517	2	1	1.553	2176,1	72,5	72,5
	Young	16.756	0,697	11,7	5.606	2	1	1.553	1266,4	42,2	42,2
Rivera	Rivera	64.465	0,757	48,8	23.424	5	3	4.660	2345,5	78,2	75,0
Rocha	Rocha	25.422	0,727	18,5	8.871	2	1	1.553	2286,9	76,2	75,0
Salto	Salto	104.011	0,7973	82,9	39.805	9	5	7.767	2224,9	74,2	74,2
San José	San José de Mayo	36.743	0,727	26,7	12.822	3	2	3.107	2024,0	67,5	67,5
	Delta del Tigre y Villas	20.239	0,727	14,7	7.063	2	1	1.553	1721,6	57,4	57,4
	Libertad	10.166	0,697	7,1	3.401	1	1	1.553	1154,9	38,5	38,5
Soriano	Mercedes	41.974	0,727	30,5	14.647	4	2	3.107	1803,2	60,1	60,1
	Dolores	17.174	0,697	12,0	5.746	2	1	1.553	1310,1	43,7	43,7
Tacuarembó	Tacuarembó	54.755	0,757	41,4	19.896	5	3	4.660	1904,5	63,5	63,5
	Paso de los Toros	12.985	0,697	9,1	4.344	1	1	1.553	1744,3	58,1	58,1
Treinta y Tres	Treinta y Tres	25.477	0,727	18,5	8.890	2	1	1.553	2292,9	76,4	75,0

Memoria de Cálculo

Tomo 2: Anteproyecto

Regionalización de Rellenos Sanitarios en el Interior del país, con generación de energía eléctrica



Verónica Garicoits

Luciana Pan

Tutores:

Dra. Ing. Elizabeth González

MSc. Ing. Nicolás Rezzano

Dr. Ing. José Cataldo

Proyecto de Fin de Carrera

Julio 2016

Índice

1 Introducción 6
2 Conformación de los módulos 7
3 Generación de biogás 10
3.1 Estimación de la generación de biogás 10
3.2 Diseño del sistema de recolección de biogás 11
4 Generación de lixiviado 12
4.1 Serie de precipitación 13
4.2 Infiltración a través del material de cubrición 15
4.3 Balance anual 16
4.4 Balance mensual 24
5 Sistema de recolección de lixiviado 27
5.1 Diseño de sistema 28
5.1.1 Tiempo de desagote para avenida de diseño 28
5.1.2 Verificación de la capacidad de conducción 29
5.1.3 Verificación para el caudal de lixiviado 30
5.1.4 Verificación estructural de las conducciones 31
6 Tratamiento de lixiviado 38
6.1 Caracterización del efluente 38
6.1.1 Dilución en eventos de lluvia 38
6.2 Diseño del sistema de tratamiento 39
6.2.1 Ingreso a la planta de tratamiento 39
6.2.2 Tiempo seco 42
6.2.3 Tiempo lluvia 47
6.3 Remoción de nitrógeno 55
6.3.1 Diseño del humedal de flujo vertical 56
6.4 Conducciones entre lagunas 57
6.4.1 Modelación en el SWMM 57
7 Descarga de la planta de tratamiento 58
7.1 Emisario 58
8 Conducción de pluviales 60

8.1 Diseño de las cunetas 60
9 Bibliografía 63

Índice de Figuras

Figura 1.- Distribución en forma de triángulo equilátero, pozos de recolección biogás. Imagen tomada de [2] 11
Figura 2.- Esquema del balance hidrológico en la masa de residuos 13
Figura 3.- Esquema del balance de lixiviado anual 17
Figura 4.- Esquema del balance de lixiviado mensual 25
Figura 5.- Solicitaciones sobre una tubería enterrada en zanja 32
Figura 6.- Caño en condición de “zanja angosta” 33
Figura 7.- Esquema de acción del tránsito vehicular 34
Figura 8.- Esquema del cálculo de la carga por el tránsito vehicular 36
Figura 9.-Bomba DAB, modelo NOVA 180 51
Figura 10.- Esquema de conducción de las pluviales 60

Índice de Tablas

Tabla 1.- Cálculo de la geometría de cada modulo 9
Tabla 2.- Caracterización de residuos, [2] 10
Tabla 3.- Radio de influencia y separación entre pozos de recolección 12
Tabla 4.- Datos estadísticos de precipitación de 1981 a 2011 (Estación Meteorología "Mercedes") 13
Tabla 5.- Probabilidad de ocurrencia y Tr de la serie de máximos anuales diarios de precipitación 14
Tabla 6.- Datos estadísticos de precipitación de 1983 a 2002 (Estación Meteorología "Mercedes") 15
Tabla 7.- Coeficientes de ETP y ETP mensual 15
Tabla 8.- Parámetros para el cálculo del agua consumida 18
Tabla 9.- Resultados del balance de lixiviado anual 23
Tabla 10.- Máximo caudal por tubería 28
Tabla 11.- Cálculos para avenida de diseño 28
Tabla 12.- Tiempo de desagote por tubería para avenida de diseño 29

Tabla 13.- Verificación del funcionamiento del colector a tratamiento 29
Tabla 14.- Verificación del funcionamiento de la conducción principal 30
Tabla 15.- Verificación del funcionamiento del dren secundario 30
Tabla 16.- Verificación del funcionamiento del colector a tratamiento 30
Tabla 17.- Características de las conducciones 31
Tabla 18.- Verificación del concepto de "zanja angosta" 33
Tabla 19.- Resultado de la Carga del relleno (Qr) 34
Tabla 20.- Características del camión recolector 35
Tabla 21.- Coeficiente Ci en función de la altura del material de relleno (H) 36
Tabla 22.- Resultado de la Carga por el tránsito vehicular (Qt) 36
Tabla 23.- Resultados de la deformación de las tuberías 37
Tabla 24.- Caudales y concentraciones de diseño 38
Tabla 25.- Características del caño de entrada a la cámara de rebose 40
Tabla 26.- Características del caño de salida de la cámara de rebose (hacia L. Ecualización) 41
Tabla 27.- Parámetros de diseño del orificio de salida de la cámara de rebose 42
Tabla 28.- Parámetros de diseño, tiempo seco 42
Tabla 29.- Dimensiones laguna anaerobia 43
Tabla 30.- Laguna anaerobia, tiempo seco 44
Tabla 31.- Dimensiones facultativa 1 44
Tabla 32.- Laguna facultativa 1, tiempo seco 46
Tabla 33.- Dimensiones facultativa 2 46
Tabla 34.- Laguna facultativa 2, tiempo seco 47
Tabla 35.- Dimensiones laguna ecualización 49
Tabla 36.- Balance diario y mensual 49
Tabla 37.- Diámetro y velocidad tubería 50
Tabla 38.- Longitud equivalente, codos 50
Tabla 39.- Pérdidas de carga 50
Tabla 40.- Características bomba 51
Tabla 41.- Permanencia caudales de diseño 51
Tabla 42.- Eventos asociados al caudal pico 52
Tabla 43.- Cargas, Caudal pico 52
Tabla 44.- Parámetros de diseño, tiempo de lluvia 53

Tabla 45.- Laguna anaerobia, tiempo de lluvia 53
Tabla 46.- Laguna facultativa 1, tiempo de lluvia 54
Tabla 47.- Laguna facultativa 2, tiempo de lluvia 55
Tabla 48.- Resultados en remoción de nitrógeno en el total del sistema 55
Tabla 49.- Dimensiones del humedal 56
Tabla 50.- Humedal, tiempo seco 56
Tabla 51.- Características, conducciones entre lagunas 57
Tabla 52.- Hidrogramas de salida, modelados en SWMM 57
Tabla 53.- Variación de niveles en las lagunas, modelados en SWMM 58
Tabla 54.- Perfil 58
Tabla 55.- Características de las subcuencas y los tramos de aporte 61
Tabla 56.- Resultados para cada tramo de aporte 62

Índice de Gráficos

Gráfico 1.- Resultados del lixiviado anual por modulo 24
Gráfico 2.- Resultados del lixiviado total anual 24
Gráfico 3.- Resultados del lixiviado mensual por módulo 27
Gráfico 4.- Resultados del lixiviado mensual total 27
Gráfico 5.- Serie de caudales base 42
Gráfico 6.- Perfil emisario 59

Acrónimos

RS: Residuos Sólidos

RSa: Relleno Sanitario

SDF: Sitio de Disposición Final

GEI: Gas de Efecto Invernadero

PTR: Propuesta Técnica para la Reglamentación

1 Introducción

Esta memoria tiene por objetivo presentar la metodología y los cálculos realizados para dimensionar las instalaciones que conforman en el relleno regional.

Algunos de los procedimientos llevados a cabo para la determinación parámetros de empleados en el diseño del relleno regional se encuentran detallados en la Memoria de Cálculo, Tomo I. Esto se debe a que dichos parámetros fueron empleados en análisis previos al caso de estudio y se consideró innecesario presentarlos nuevamente.

Particularmente, la tasa de crecimiento poblacional, la tasa de generación de residuos y el dimensionado de la planta de generación de energía no se presentan en la siguiente memoria, ya que se puede encontrar detallado el proceso de cálculo en las Secciones 2.1, 2.2 y 2.4 de la Memoria de Calculo, Tomo I.

2 Conformación de los módulos

Cada módulo es conformado a partir de cinco niveles que son completados con los residuos ingresados durante un año de funcionamiento del RSa. La geometría dada para los módulos es de tronco pirámide tanto por encima del nivel del terreno como por debajo, con pendientes en ambos casos de 1V:3H.

Para determinar la geometría de cada nivel en cada módulo, se define el volumen total del nivel como los residuos ingresados al sitio incrementado en un 30% de forma de considerar el material de cubrición, tanto diario como intermedio, en cada nivel.

$$Vtotal\,(m^3) = 1{,}3 \cdot Vresiduos$$

Luego se definió la profundidad de excavación en cada módulo de 1,8 m por debajo del nivel del terreno, y para determinar el área superficial para cada nivel se comenzó el cálculo suponiendo un valor para el área superficial mayor, y a partir de la siguiente formula se calcula el volumen* de dicho nivel:

$$Vtotal^{*}(m^3) = \frac{h}{3} \cdot (3 * As^{mayor} - 6 \cdot h \cdot m \cdot \sqrt{As^{mayor}} + 4 \cdot m^2 \cdot h^2)$$

Siendo:

- Pendiente del talud: m = 3
- Profundidad de excavación: h = 1,8 m
- Área superficial mayor: $As^{mayor}(m^2)$

Se itera el valor del As^{mayor} a partir del volumen total definido previamente y el volumen total* calculado con la formula.

Aplicando la siguiente formula se determina el área superficial inferior:

$$As^{inferior} = \left(\sqrt{As^{mayor} - 2 \cdot m \cdot h}\right)^2$$

Para calcular el área superficial menor en el nivel dos (el cual se encuentra ya por sobre el nivel del terreno) se iguala el área superficial mayor del segundo nivel al área superficial mayor determinada para el primer nivel, y se determina el área superficial inferior aplicando la ecuación anterior.

Luego, para el nivel tres se iguala el área superficial mayor del mismo al área superficial menor del nivel anterior (nivel dos) y se calcula el área superior inferior del nivel en cuestión aplicando la ecuación anterior.

En el cuarto nivel se construye una berma de 4 metros de ancho, y se procede a determinar las áreas superficiales mayor e inferior de la misma forma que para el nivel tres.

Por último, en el nivel cinco se calculan el área superficial mayor como la resta entre el área superficial inferior y el área de la berma, y luego se determina el área superficial menor del nivel en cuestión aplicando la ecuación anterior.

Aplicando el mismo procedimiento para cada módulo, se determinaron las geometrías presentadas en la Tabla 1.

Modulo	Año	Nivel	V Residuos (m3)	V total (m3)	Altura nivel (m)	Altura acumulado (m)	Área superficial mayor (m2)	Área berma (m2)	Área superficial menor (m2)	Largo menor (m)	Largo mayor (m)	Área máx (m2)
	2016	1.1	32.356	42.063	1,80	1,8	25.039		21.737	147	158	
	2017	2.1	32.567	42.337	1,81	3,6	25.039		21.715	147	158	
1	2018	3.1	32.778	42.612	2,14	5,8	21.715		18.089	134	147	25.039
	2019	4.1	32.991	42.889	2,68	8,4	18.089	1.831	14.025	118	134	
	2020	5.1	33.206	43.168	4,59	13,0	12.194		6.871	83	110	
	2021	1.2	33.422	43.448	1,80	1,8	25.835		22.480	150	161	
	2022	2.2	33.639	43.731	1,81	3,6	25.835		22.457	150	161	
2	2023	3.2	33.858	44.015	2,14	5,8	22.457		18.777	137	150	25.835
	2024	4.2	34.078	44.301	2,66	8,4	18.777	1.873	14.664	121	137	
	2025	5.2	34.299	44.589	4,46	12,9	12.790		7.457	86	113	
	2026	1.3	34.522	44.879	1,80	1,8	26.657		23.247	152	163	
	2027	2.3	34.747	45.170	1,81	3,6	26.657		23.224	152	163	
3	2028	3.3	34.972	45.464	2,13	5,7	23.224		19.490	140	152	26.657
	2029	4.3	35.200	45.760	2,64	8,4	19.490	1.917	15.325	124	140	
	2030	5.3	35.429	46.057	4,34	12,7	13.409		8.060	90	116	
	2031	1.4	35.659	46.356	1,80	1,8	27.506		24.040	155	166	
	2032	2.4	35.891	46.658	1,81	3,6	27.506		24.017	155	166	
4	2033	3.4	36.124	46.961	2,13	5,7	24.017		20.227	142	155	27.506
	2034	4.4	36.359	47.266	2,61	8,4	20.227	1.961	16.011	127	142	
	2035	5.4	36.595	47.573	4,23	12,6	14.050		8.683	93	119	

Tabla 1.- Cálculo de la geometría de cada modulo

3 Generación de biogás

3.1 Estimación de la generación de biogás

El modelo empleado para estimar la generación de biogás en el relleno es el General de dos fases, el cual fue seleccionado y corregido en la Sección 2.4 de la Memoria Justificativa. Este modelo incluye dos (o más) fases de degradación de los residuos, particularmente en este caso se optó por incluir una fracción lentamente biodegradable y otro rápidamente biodegradable.

La ecuación empleada es:

$$G_{CH_{4,n}} = \left[F_l \cdot \sum_{t=c}^{n-1} k_i^l L_0 M_{i,t} e^{-k_i^l (n-t)} + F_r \cdot \sum_{t=c}^{n-1} k_i^r L_0 M_{i,t} e^{-k_i^r (n-t)}\right] \cdot f_c$$

Siendo:

- Potencial de generación de metano: L_0 = 94 m^3/ton
- Tasa de generación de metano para la fracción lentamente degradable: k^l = 0,056 $año^{-1}$
- Tasa de generación de metano para la fracción rápidamente degradable: k^r= 0,28 $año^{-1}$
- Porcentaje de residuos lentamente degradable: F_l = 9 %
- Porcentaje de residuos rápidamente degradable: F_r = 56 %
- $M_{i,t}$: toneladas de residuos sólidos dispuestos o proyectados a disponer de la fracción *i* en el año *t*
- Factor de corrección: f_c = 0,56

La composición empleada se detalla en la Tabla 2

Composición de los residuos: Composición (%) peso	
Plásticos	16%
Vidrio	3,5%
Textiles	3,5%
Metales	2,9%
Papel Cartón	14,6%
Materiales orgánicos	41,7%
Madera, ramas de arboles	3,4%
Cuero, goma	1,7%
Otros	12,4%

Tabla 2.- Caracterización de residuos, [2]

Por otro lado, los porcentajes de residuos lentamente y rápidamente biodegradables empleados fueron determinados a partir de la estimación estequiometria planteada en bibliografía [1], el procedimiento se detalla en la Sección 1.1.2 de la Memoria de Cálculo (Tomo 1).

Como se explicó en la Memoria Justificativa, Sección 2.4., el modelo fue ajustado a partir de los datos relevados en el Relleno Sanitario "Las Rosas". El factor empleado para ajustar el modelo es el denominado Factor de corrección (f_c) y el valor determinado para dicho parámetro es de 0,56.

Dicho factor incluye diversas variables, que producen una disminución en la cantidad y calidad del biogás, tales como: el efecto por las sequias que provoca grietas en la tapada superior, posibles fallas en la operación del relleno como suele suceder en los días lluviosos, entre otros.

3.2 Diseño del sistema de recolección de biogás

Para el diseño del sistema de recolección de biogás se consideró un radio de influencia de 1,25 veces la profundidad del relleno y una distribución en base a un esquema teórico de disposición equidistante entre tuberías que se presenta en la Figura 1.

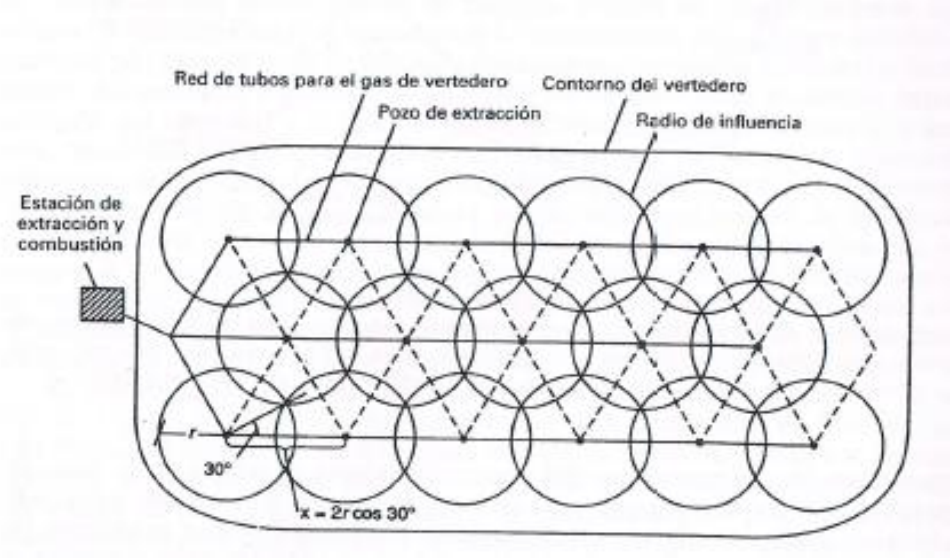


Figura 1.- Distribución en forma de triángulo equilátero, pozos de recolección biogás. Imagen tomada de [2]

Teniendo en cuenta dicha distribución, se obtiene la siguiente relación entre los radios de influencia y el espaciamiento entre los pozos:

$$\frac{b}{2} = R \cdot cos30° \rightarrow b = 2 \cdot R \cdot cos30°$$

Los pozos serán colocados en dos niveles, el nivel superior del módulo y en la berma, las profundidades totales asociadas a cada módulo, radios de influencia y espaciamientos se presentan en la Tabla 3:

Módulo	Profundidad (m)	Radio influencia (m)	b (m)
1	13,0	16	28
2	12,9	16	28
3	12,7	16	28
4	12,6	16	27
Berma			
1	8,4	11	18
2	8,4	11	18
3	8,4	10	18
4	8,4	10	18

Tabla 3.- Radio de influencia y separación entre pozos de recolección

4 Generación de lixiviado

Para determinar el lixiviado se empleó la metodología presentada en el Tchobanoglous[1]. El balance propuesto es de paso anual y supone que todos los niveles dentro del módulo poseen la misma geometría ya que se considera que se dispone la misma cantidad de residuos diariamente, con lo cual el cálculo de cantidad de lixiviado producido se realiza por unidad de área superficial en m^2.

A grandes rasgos el balance se realiza sumando el agua entrante por unidad de área de un nivel de residuos dentro de un módulo. Como ya fue mencionado cada módulo será explotado en 5 niveles, los cuales son completados con los residuos que ingresan y se disponen en el RSa durante un año.

Luego al contenido de humedad de la capa de residuos se le sustrae el agua perdida en ese mismo año, dando como resultado el agua disponible en el año. Por último, para saber si se producirá o no lixiviado se compara este valor con la cantidad de agua que pueden retener los residuos (Capacidad de Campo), y si la humedad acumulada en los residuos es mayor a la capacidad de campo de los mismos se generará lixiviado.

$$Lixiviado\ (kg\ /m^3) = W_{MC} + W_{RS} + W_{ll} - W_{GV} - W_E - \Delta S_{RS}$$

Siendo:

- Humedad en el material de cobertura:W_{MC}(kg/m^3)
- Humedad en los residuos sólidos entrantes:W_{RS}(kg/m^3)
- Humedad filtrada superiormente: W_{ll}(kg/m^3)
- Agua perdida en la formación de vapor de agua y gas en el relleno:W_{GV}(kg/m^3)
- Variación de la cantidad de agua almacenada en los RSU:ΔS_{RS}(kg/m^3)

[1] Gestión Integral de Residuos Sólidos – G. Tchobanoglous; pág. 571, Ejemplo 11.11

En la Figura 2 se presenta un esquema con todos los componentes que se incluyen en el balance hidrológico por unidad de área de residuos salidos con cobertura. En la Sección 5.6.1.de la Memoria Justificativa se realiza una breve descripción de los términos mencionados.

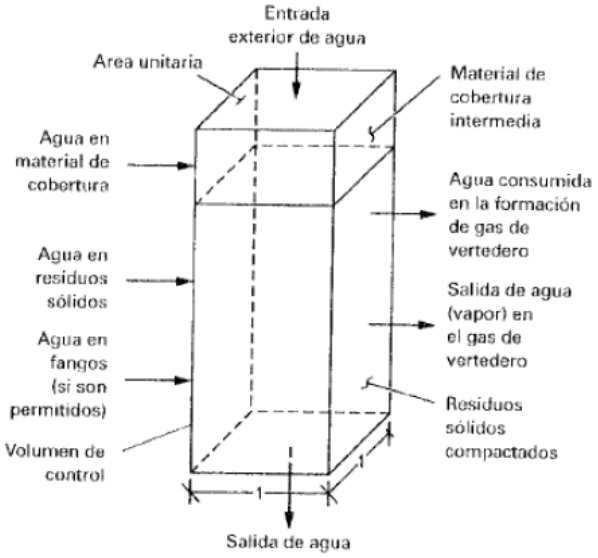


Figura 2.- Esquema del balance hidrológico en la masa de residuos

Para determinar la producción de lixiviado total en el Relleno Regional, se adaptó el balance a la geometría particular de los módulos propuestos, como se explica en la Sección4.3.

En primer lugar se debe estimar la infiltración a través de la cobertura diaria, intermedia y final, para ello se emplea un serie de precipitaciones, que se describe a continuación.

4.1 Serie de precipitación

Se obtuvieron los datos de precipitación registrados por la estación meteorología “Mercedes”, código 2145 (X=292.000; Y=6.319.000). La serie cuenta con 31 años de datos diarios, comenzando el 1ero de Enero de 1981 hasta el 31 de Diciembre del 2011.

Se realizó un pequeño análisis estadístico de los datos, con el objetivo de seleccionar 20 años continuos para emplear en el balance. En la Tabla 4 se presentan algunos resultados.

Datos de precipitación – Estación Meteorológica “Mercedes” (1981 – 2011)	
Precipitación media (mm)	13,4
Precipitación máxima (mm)	176,5
Precipitación mínima (mm)	0,1
Cantidad de días c/lluvia	2728
Total datos	11322
Porcentaje de lluvia (%)	24%

Tabla 4.- Datos estadísticos de precipitación de 1981 a 2011 (Estación Meteorología "Mercedes")

Luego, se determinaron los máximos anuales diarios, y para ellos se calculó la probabilidad de ocurrencia dentro de la serie de 31 años, y su correspondiente periodo de retorno, obteniéndose los resultados de la Tabla 5.

Año real	Máximo anual (mm/d)	P Weibull	Tr (años)
1981	75,8	0,563	2
1982	140,9	0,219	5
1983	110,4	0,313	3
1984	173	0,063	16
1985	79,5	0,531	2
1986	64,5	0,844	1
1987	80,6	0,500	2
1988	74	0,594	2
1989	72,2	0,656	2
1990	82	0,469	2
1991	91,2	0,406	2
1992	104	0,344	3
1993	149	0,156	6
1994	62	0,875	1
1995	159	0,125	8
1996	61	0,906	1
1997	72,4	0,625	2
1998	71	0,719	1
1999	65	0,781	1
2000	65	0,813	1
2001	71,5	0,688	1
2002	162	0,094	11
2003	85	0,438	2
2004	123,6	0,281	4
2005	59	0,938	1
2006	176,5	0,031	32
2007	135,4	0,250	4
2008	52,8	0,969	1
2009	103,5	0,375	3
2010	141	0,188	5
2011	68	0,750	1

Tabla 5.- Probabilidad de ocurrencia y Tr de la serie de máximos anuales diarios de precipitación

Se seleccionaron los datos desde 1983 hasta el 2002 para utilizar en los cálculos, debido a que en dichos 20 años continuos se da la 2da lluvia más fuerte del total de la serie, y las tres que le siguen a esta, dejando de lado el año que presenta le menor probabilidad de ocurrencia (2006). Dentro de la serie elegida se determinaron nuevamente algunos parámetros estadísticos, con el fin de verificar que la serie elegida sea representativa.

Datos de precipitación – Estación Meteorológica "Mercedes" (1983 – 2002)	
Precipitación media (mm/d)	13,3
Precipitación máxima (mm/d)	173,0
Precipitación mínima (mm/d)	0,1

Tabla 6.- Datos estadísticos de precipitación de 1983 a 2002 (Estación Meteorología "Mercedes")

4.2 Infiltración a través del material de cubrición

Existen tres tipos de cobertura a colocar: la diaria, la cual como lo dice su nombre se realiza diariamente, luego de la disposición de los residuos y tiene un espesor de 20 cm, luego la intermedia la cual se realiza luego de alcanza la altura máxima determinada para el nivel en el cual se encuentra trabajando y es de 30 cm de espesor, y por último la tapada final que se coloca luego de llenado todo el modulo, que se caracteriza por ser impermeable y por lo tanto no existe infiltración una vez clausurado el módulo.

Para las coberturas se realizó un balance de manera de obtener la infiltración correspondiente, siguiendo el razonamiento a continuación:

1. Se calculó la variación de humedad (mm/mes), como:

$$\Delta H = P - ETP - Esc$$

Siendo:

- Evapotranspiración potencial: ETP (mm/mes). Se determinó a partir de la ETP media anual (92 mm/año) y corregida por los coeficientes mensuales, obteniéndose los valores de la Tabla 7.

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Fracción de la ETP anual	1,88	1,45	1,19	0,73	0,44	0,29	0,35	0,55	0,78	1,12	1,47	1,78
ETP mensual (mm/mes)	172,96	133,4	109,48	67,16	40,48	26,68	32,2	50,6	71,76	103,04	135,24	163,76

Tabla 7.- Coeficientes de ETP y ETP mensual

- Escorrentía: Esc (mm/mes). Determinada como:

$$Esc = P \cdot Coef.escorrentia$$

El coeficiente de escorrentía, se supuso de 0,5 según recomendaciones para arcilla compactada[2]

2. Se determinó el déficit de agua del material de cubrición (mm/mes), como:

[2]Tchobanonglous; pág. 514; tabla 11.2.

$$\begin{cases} si\ \Delta H_i + Deficit_{i-1} > 0\ \rightarrow Deficit_i = 0 \\ si\ \Delta H_i + Deficit_{i-1} < 0 \begin{cases} si\ \Delta H_i + Deficit_{i-1} < -Máx.Humedad\ \rightarrow\ Deficit_i = -Máx.Humedad \\ si\ \Delta H_i + Deficit_{i-1} > -Máx.Humedad\ \rightarrow\ Deficit_i = \Delta H_i + Deficit_{i-1} \end{cases} \end{cases}$$

Siendo

- i: el mes de calculo
- i-1: el mes anterior

Máx. Humedad: el almacenamiento máximo de humedad de la cobertura (mm), calculado como:

$$Máx.Humedad = 10 \cdot (CC - PMP) \cdot Espesor$$

Siendo

- Capacidad de campo: CC = 27 cm/m
- Punto de marchitez permanente: PMP = 12 cm/m([3])

Para el primer mes de la serie se supuso que el déficit del mes anterior era igual a cero.

3. Luego se calculó la infiltración a través de la cobertura (mm), como:

$$\begin{cases} si\ \Delta H_i < 0\ \rightarrow infiltración_i = 0 \\ si\ \Delta H_i > 0\ \rightarrow infiltración_i = Deficit_i \end{cases}$$

Como resultado se obtiene la infiltración mensual a través de las coberturas, empleando la serie de precipitación durante los 20 años seleccionados.

4.3 Balance anual

En primer lugar se realizó el cálculo de generación de lixiviado con paso anual, según la metodología presentada en bibliografía [1].

El procedimiento empleado sigue el esquema de la Figura 3. Es decir, el lixiviado generado durante el año 1 en el nivel 1 es calculado a partir del contenido de humedad inicial de los residuos.

Luego el lixiviado producido en el nivel 1 el año 2 (cuando el nivel 2 ya se encuentra colocado) se calcula a partir del agua retenida y el contenido de agua en los residuos del nivel 1 al final del año 2. El contenido de agua en los residuos del nivel 1 al final del año 2, se determina a partir del agua retenida en el nivel 1 al final del año 1 y del lixiviado generado por la capa de residuos colocada en el nivel 2 en su primer año de colocación.

El proceso se repite sucesivamente a medida que se colocan los siguientes niveles, por lo cual para calcular el lixiviado que se genera luego de atravesar toda la masa de residuos y en particular del

[3] Datos recomendados por Tchobanonglous

nivel 1 en el año n, es necesario previamente calcular el lixiviado generado el primer año de disposición del nivel n, es decir el año n, luego determinar el lixiviado generado el año n en el nivel n-1, y así sucesivamente hasta el nivel 1.

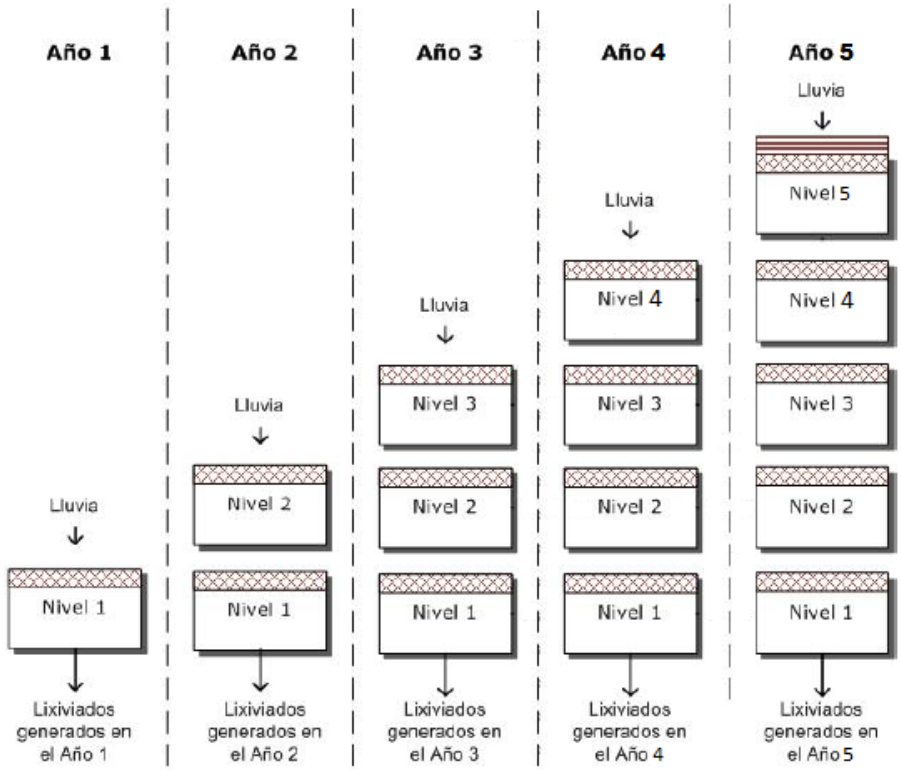


Figura 3.- Esquema del balance de lixiviado anual

En particular, en la construcción de los módulos propuestos para el caso de estudio, el primer nivel se encuentra excavado. Por dicha razón, en el balance de infiltración planteado es corregido eliminado la escorrentía ya que hasta que el nivel no se encuentra terminado la lluvia que cae dentro de la excavación es drenada a través de las conducciones de lixiviado. Se analizó una lluvia de 25 años de periodo de retorno, y el tiempo de evacuación de la misma, como se detalla en la Sección 5.1.1.

El procedimiento empleado para determinar el lixiviado generado anualmente se describe a continuación.

1. El primer paso para determinar el lixiviado generado en el RSa para el año de disposición de residuos en un nuevo nivel es calcular el *Agua en los residuos* a través de la siguiente formula[4]

$$Agua\ en\ los\ RS = Peso\ lluvia + Contenido\ de\ Humedad - Agua\ consumida - Vapor\ de\ agua\ en\ gas$$

[4] Los parámetros son calculados en kg/m^2

- Peso lluvia (kg/m^2): para el primer nivel de cada módulo se determina como la sumatoria de la infiltración mensual, sin considerar la escorrentía. Para el resto de los niveles que se encuentran por encima del nivel del terreno se emplea el balance completo. Se consideró que la densidad de la lluvia era de 999 kg/m^3.

$$Peso\ lluvia(kg/m^2) = \sum_{i=1}^{i=12} Infiltración\ menusal_i \cdot Densidad\ lluvia\ (kg/m^3)$$

- Contenido de humedad (kg/m^2): es el contenido de humedad de los residuos, considerado de 43%[5].
- Agua consumida: es la cantidad de agua que se consume durante la degradación de los residuos. Se determinó el agua consumida por m^3 de biogás generado para la fracción rápidamente biodegradable y para la fracción lentamente biodegradable por separado:

$$Agua\ consumida\ (kg\ H_2O/m^3 gas) = \frac{Agua\ consumida\ (kg\ H_2O/m^3 RS(RB/LB))}{Gas\ por\ unidad\ de\ residuos\ (m^3/kg)}$$

$$Agua\ consumida\ (kg\ H_2O/m^3 RSRB) = \frac{Masa\ Molar\ H_2O\ (kg/mol)}{Masa\ Molar\ RSRB\ (kg/mol)}$$

Para cada fracción se emplearon los siguientes valores de la Tabla 8.

	Masa molar agua (H_2O kg/mol)	288
Fracción RB	Masa molar RSRB (kg $C_{68}H_{111}O_{50}N$/mol)	1741
	Cantidad de residuos RB	56%
	Gas por unidad de residuos (m3/kg)	0,87
Fracción LB	Masa molar RSLB (kg $C_{20}H_{29}O_{50}N$/mol)	427
	Cantidad de residuos RB	9%
	Gas por unidad de residuos (m3/kg)	1,03

Tabla 8.- Parámetros para el cálculo del agua consumida

Para determinar el agua consumida total, se multiplica el agua consumida por cada fracción por el biogás producido por los residuos rápida y lentamente degradables respectivamente y por ultimo por el peso total de residuos sólidos por metro cuadrada, asumiendo que la densidad de los mismos luego de compactados alcanza los 700 kg/m^3. Además se consideró un aumento en el volumen de residuos a disponer debido al material de cubrición diaria e intermedio, por lo que se determinó la relación Volumen/Área y se adiciono al peso de los residuos.

$$Peso\ Residuos\ (kg/m^2) = (V/A) \cdot Densidad\ RS\ (kg/m^3)$$

[5] Dato extraído del informe de caracterización de residuos de LKSur.

Siendo:

- V/A: la relación volumen/área. Varía en función del nivel en el cual nos encontremos, en particular, para los niveles superiores esta relación crece ya que se tiene mayor cantidad de residuos y menor área superficial.

$$Agua\ consumida\ (kg/m^2) = [[Agua\ consumida(kg\ H_2O/m^3 gas) \cdot Biogas\ producido\ (m^3\ gas/kg.\text{año})]_{RB} + [Agua\ consumida(kg\ H_2O/m^3 gas) \cdot Biogas\ producido\ (m^3 gas/kg.\text{año})]_{LB}] \cdot Peso\ Residuos\ (kg/m^2)$$

- Vapor de agua consumido (kg/m^2): es el vapor de agua consumido en la degradación de los residuos. Se determinó a partir de Ley de los gases, suponiendo que la temperatura de la masa de residuos en promedio es de 25 °C:

$$Vapor\ consumido\ (kg/m^3 gas) = n\ (moles) \cdot Masa\ Molar\ H_2O\ (kg/mol)$$

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}$$

$$Vapor\ consumido(kg/m^2) = [Biogas\ producido\ RB\ (m^3\ gas/kg.\text{año}) + Biogas\ producido\ LB\ (m^3\ gas/kg.\text{año})] \cdot Vapor\ consumido\ (kg/m^3 gas) \cdot Peso\ Residuos(kg/m^2)$$

2. Luego, se determinó el *Peso seco RS al final del año*, empleando la siguiente ecuación:

$$Peso\ Seco\ RS\ fin\ \text{año}\ (kg/m^2) = Peso\ seco\ RS\ (kg/m^2) - Biogas\ producido - Agua\ consumida$$

$$Peso\ seco\ RS\ (kg/m^2) = Peso\ RS\ (kg/m^2) \cdot (1 - Contenido\ Humedad)$$

$$Biogas\ producido\ (kg/m^2) = Densidad\ biogas\ (kg/m^3 gas) \cdot Peso\ RS\ (kg/m^2) \cdot [Biogas\ producido\ RB\ (m^3\ gas/kg.\text{año}) + Biogas\ producido\ LB\ (m^3\ gas/kg.\text{año})]$$

Siendo

- Densidad biogás = 1339 kg/m^3

3. A partir del *Peso seco de RS al final del año* se calcula el *Peso medio* del nivel, suponiendo que el peso medio en el nivel 1 se producirá en el punto medio de los residuos del nivel 1.

$$Peso\ medio\ (kg/m^2) = 0{,}5 \cdot [Agua\ en\ los\ RS\ (kg/m^2) + Peso\ Seco\ RS\ fin\ año\ (kg/m^2)] + Material\ de\ Cubricion\ (kg/m^2)$$

$$Material\ de\ Cubrición\ (kg/m^2) = \frac{V}{A} \cdot Densidad\ Cubrición\ (kg/m^3) \cdot Relacion\ cubrición/residuos$$

Siendo

- Densidad cubrición = 1770 kg/m^3
- Relación cubrición/residuos = 0,3. Como ya fue mencionado se supuso un 30% más en el volumen total, debido al material de cubrición

4. Se debe calcular el agua retenida en los residuos en el nivel 1, es decir la cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos, la cual se determina a partir del *Factor de Capacidad de Campo* utilizando la siguiente ecuación.

$$FC = 0{,}6 - 0{,}55 \cdot \left[\frac{Peso\ medio}{4536 + Peso\ medio}\right]$$

$$Agua\ retenida = FC \cdot Peso\ Seco\ RS\ fin\ año\ (kg/m^2)$$

5. Para determinar la cantidad de lixiviados producidos se compara la cantidad de agua en los residuos y el agua efectivamente retenida. Si la cantidad de agua que pueden retener los residuos es mayor que la cantidad real de agua presente en los mismos, no se producirán lixiviados.

$$Lixiviado\ (kg/m^2) = \begin{cases} si\ (Agua\ en\ los\ RS - Agua\ retenida) > 0 \rightarrow Agua\ en\ los\ RS - Agua\ retenida \\ si\ no \rightarrow 0 \end{cases}$$

6. Luego, se determinó el peso total del nivel. Este cálculo es necesario particularmente cuando se requiere determinar el peso medio en el nivel 1, luego de que ya se han depositado los niveles superiores por encima del mismo.

$$Peso\ total\ nivel\ (kg/m^2) = Peso\ Seco\ RS\ fin\ año + Agua\ restante + Material\ de\ cubrición$$

$$Agua\ restante(kg/m^2) = Agua\ en\ los\ RS - Lixiviado$$

7. Por último, se determina la cantidad de lixiviado producido en metros cúbicos:

$$Lixiviado\ (m^3) = \frac{Lixiviado\ (kg/m^2) \cdot Area\ (m^2)}{Densidad\ lixiviado\ (kg/m^3)}$$

Siendo

- Densidad lixiviado = 1000 kg/m^3

Este procedimiento es realizado para los primeros niveles en todos los módulos. Luego, a medida que se depositan nuevos niveles en cada módulo, se reitera el procedimiento diferenciado en la determinación del *Peso de lluvia*, ya que al encontrarnos a nivel de terreno o por sobre el mismo, se incluye en el balance de infiltración la escorrentía.

Para continuar con el cálculo es necesario determinar el lixiviado producido en los nuevos niveles colocados, ya que para conocer el lixiviado efectivamente generado a través del nivel 1 luego de depositado el nivel 2 se debe repetir el procedimiento detallado anteriormente incluyendo la diferencia mencionada en el párrafo anterior.

Con lo cual, el lixiviado generado en el año 2 de explotación del RSa se calcula siguiendo el mismo procedimiento pero con algunas variantes:

1. *Agua en los residuos:*

$$\begin{aligned} Agua\ en\ los\ RS_{N1;año\ 2} \\ &= Agua\ retenida_{N1;año\ 1} - Agua\ consumida_{N1;año\ 2} \\ &- Vapor\ de\ agua\ en\ gas_{N1;año\ 2} + lixiviado_{N2;año\ 2} \end{aligned}$$

2. *Peso seco RS al final del año*

$$\begin{aligned} Peso\ Seco\ RS\ fin\ año_{N1;año\ 2} \\ &= Peso\ Seco\ RS\ fin\ año_{N1;año\ 1} - Biogas\ producido - Agua\ consumida \end{aligned}$$

3. *Peso medio*

$$\begin{aligned} Peso\ medio_{N1;año2} \\ &= Peso\ total\ nivel_{N2;año\ 2} + 0{,}5 \\ &\cdot \left[Agua\ en\ los\ RS_{N1;año\ 2} + Peso\ Seco\ RS\ fin\ año_{N1;año\ 2}\right] \\ &+ Material\ de\ Cubricion_{Nivel\ 1} \end{aligned}$$

4. Tanto el *Factor de Capacidad de Campo* como el *Agua retenida* se calculan utilizando la misma fórmula pero empleando los valores calculados para el año 2 en el nivel 1.
5. Se determina el *lixiviado* aplicando el mismo razonamiento explicado anteriormente pero con los valores determinados para el año 2 en el nivel 1.
6. De forma análoga a los pasos 4 y 5 se determina el *Agua restante* y el *Peso total del nivel.*

De esta forma se continua el cálculo a medida que se agregan los niveles por sobre el nivel 1, utilizando los términos correspondientes. Por ejemplo el *Agua en los* $RS_{N1;\ año\ 3}$ se determina empleando el $lixiviado_{N2;\ año\ 3}$, el cual a su vez es calculado aplicando el mismo razonamiento que para determinar el $lixiviado_{N1;\ alño\ 2}$ y para ello es preciso determinar previamente el $lixiviado_{N3;\ año\ 3}$.

En particular, para el cálculo del peso medio a medida que se dispone un nuevo nivel se adiciona el término del peso total del nivel a la ecuación. Es decir, que al $Peso\ medio_{N1;\ año\ 3}$ se calcula incluyendo el $Peso\ total\ del\ nivel_{N2;\ año\ 3}$ y el $Peso\ total\ del\ nivel_{N3;\ año\ 3}$. Luego que se coloca el ultimo nivel, no se adicionan más términos a la ecuación, solo cambian en función del nivel y del año en el cual nos encontremos realizando el cálculo.

Así sucesivamente y empleando el mismo razonamiento para el resto de los términos presentes en el balance se determina el lixiviado que puede esperarse del primer nivel luego de colocados los 5 niveles.

Al finalizar la construcción del último nivel se procede a colocar la cobertura final, la cual es considerada al calcular el *Peso medio*. Por otro lado, en esta situación, para determinar el *Agua en los residuos* no se incluye el lixiviado del nivel por encima de este (el cual no existe) ni tampoco infiltración, ya que la cobertura final es impermeable.

En la Tabla 9se presenta la cantidad de lixiviado a esperar que se obtenga a través del primer nivel luego de colocados los 5 niveles en cada módulo y durante los 25 años de funcionamiento de cada uno.

	LIXIVIADO (m^3/año)				
Año	**Módulo 1**	**Módulo 2**	**Módulo 3**	**Módulo 4**	**TOTAL**
2016	7.096,6				7.096,6
2017	10.169,0				10.169,0
2018	5.684,1				5.684,1
2019	7.629,3				7.629,3
2020	9.621,9				9.621,9
2021	1.244,7	4.167,3			5.412,0
2022	0,0	4.867,8			4.867,8
2023	41,5	6.653,1			6.694,6
2024	24,4	10.830,0			10.854,3
2025	12,2	14.041,9			14.054,0
2026	2,5	2.144,2	12.584,6		14.731,2
2027	0,0	0,0	4.874,6		4.874,6
2028	0,0	25,9	6.858,5		6.884,4
2029	0,0	9,9	9.185,0		9.194,9
2030	0,0	0,0	14.921,4		14.921,4
2031	0,0	0,0	2.127,7	7.598,0	9.725,8
2032	0,0	0,0	0,0	5.591,2	5.591,2
2033	0,0	0,0	25,3	9.665,5	9.690,8
2034	0,0	0,0	9,3	9.550,1	9.559,4
2035	0,0	0,0	0,0	17.844,3	17.844,3
2036	0,0	0,0	0,0	2.073,6	2.073,6
2037	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2038	0,0	0,0	0,0	26,5	26,5
2039	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0
2040	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 9.- Resultados del balance de lixiviado anual

En los gráficos a continuación se presentan los resultados presentados en la Tabla 9.

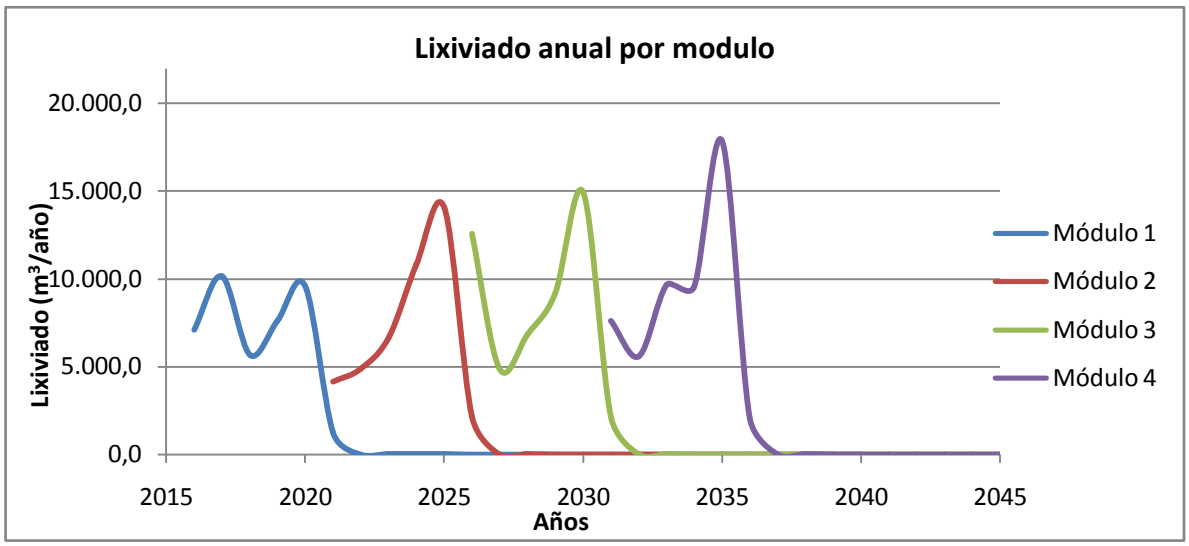


Gráfico 1.- Resultados del lixiviado anual por modulo

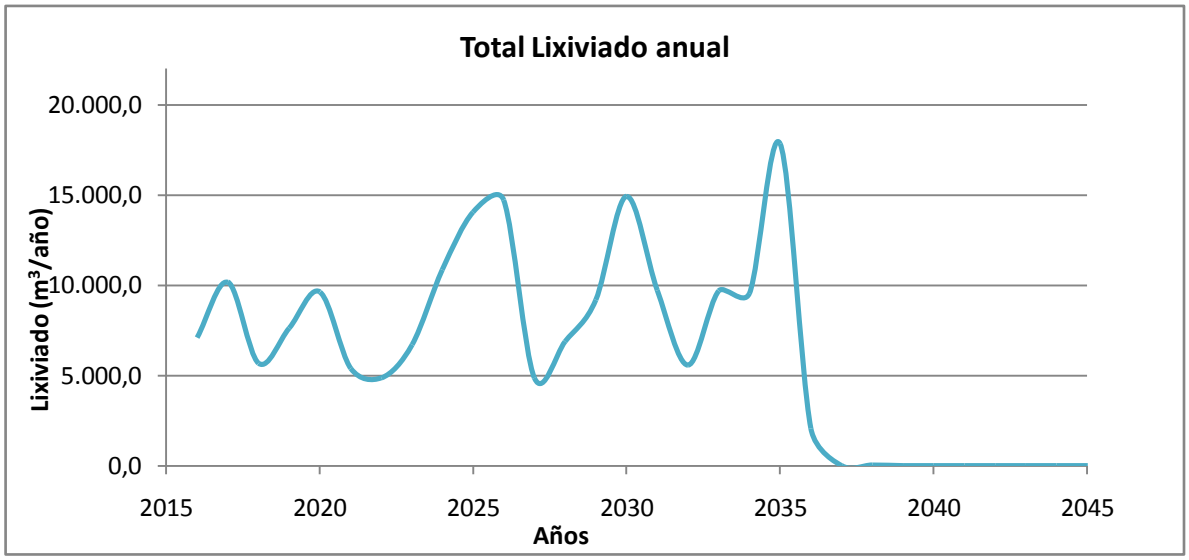


Gráfico 2.- Resultados del lixiviado total anual

4.4 Balance mensual

Con el objetivo de diseñar el sistema de tratamiento se observó la necesidad de determinar el lixiviado mensual o diario. Debido a que la generación de lixiviado depende fuertemente de la precipitación, y no todos los meses del año llueve de la misma forma, se cometía un error considerable al dividir equitativamente el lixiviado anual entre los 12 meses del año. Por lo cual se decidió calcular el balance con paso mensual, ya que diario conllevaba una complejidad mucho mayor.

La metodología empleada es análoga a la utilizada en el balance anual pero considerando 12 "porciones" dentro de un mismo nivel, para las cuales se aplica el balance, teniendo en cuenta en

qué etapa de operación se encuentre el RSa. En la Figura 4se presenta un esquema que describe el razonamiento empleado para el cálculo del lixiviado mensual.

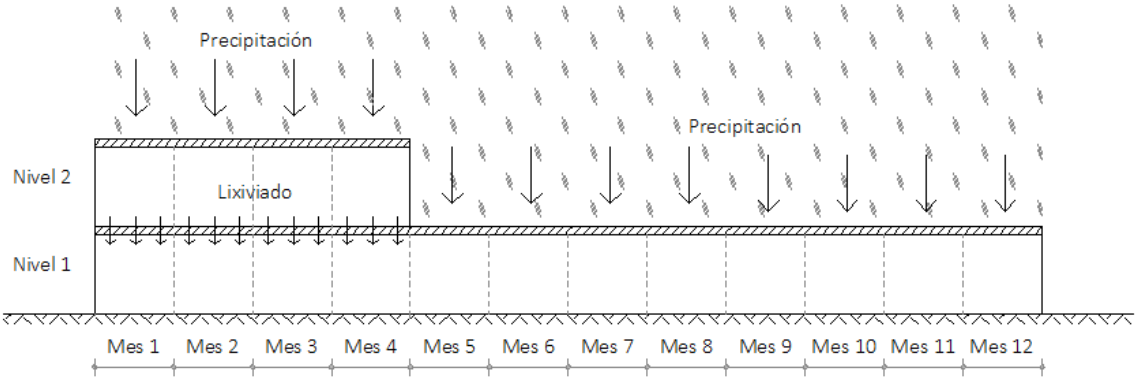


Figura 4.- Esquema del balance de lixiviado mensual

De igual forma que para el balance anual la lluvia que cae sobre el modulo durante el primera año de llenado del mismo se calcula excluyendo del balance de infiltración la escorrentía, es decir que solo se tiene en cuenta la precipitación y la evapotranspiración.

En las ecuaciones a continuación se ejemplifica el cálculo realizado para determinar el *Agua en los RS* y el *Peso seco de RS al final del año* para los dos primeros meses del año de inicio de disposición de residuos en un módulo, ya que son los componentes del balance que se requieren de mayor atención.

$$Agua\ en\ los\ RS_{N1;año\ 1;mes\ 1} = \left(Peso\ lluvia_{año\ 1;mes\ 1} + Contenido\ de\ Humedad - Agua\ consumida_{año1;mes\ 1} - Vapor\ de\ agua\ en\ gas_{año1;mes\ 1}\right) \cdot \frac{1}{12} + Peso\ lluvia_{año\ 1;mes\ 1} \cdot \frac{11}{12}$$

Para calcular el *Agua en los RS* en el primer mes de operación del primera año de un módulo, se realiza el balance sobre la porción de residuos dispuesta, es decir un 1/12 en este caso, mientras que sobre el resto del área (las restantes 11/12 partes) solo se incluye el término de la lluvia que cae sobre la misma.

El *Peso Seco de RS al final del año* para el momento de operación mencionado se determina únicamente para la porción de residuos dispuesta, como:

$$Peso\ Seco\ RS\ fin\ año_{año1;mes\ 1} = \left[Peso\ seco\ RS - \left(Biogas\ producido_{año\ 1;mes\ 1} - Agua\ consumida_{año1;mes\ 1}\right)\right] \cdot \frac{1}{12}$$

A medida que se avanza en el cálculo, se incluyen los términos correspondientes en cada componente del balance, como se explicó para el balance anual. Por ejemplo, al determinar el *Agua en los RS* en el mes 2 del año 1 se sustituye el contenido de humedad por el agua retenida del mes anterior para le primera porción de residuos, mientras que para la segunda porción de residuos dispuesta se repite el cálculo.

$$Agua\ en\ los\ RS_{N1;año\ 1;mes\ 2} = \left(Peso\ lluvia_{año\ 1;mes\ 2} + Agua\ retenida_{año\ 1;mes\ 1} - Agua\ consumida_{año1;mes\ 1} - Vapor\ de\ agua\ en\ gas_{año1;mes\ 1}\right) \cdot \frac{1}{12} + \left(Peso\ lluvia_{año\ 1;mes\ 2} + Contenido\ humedad - Agua\ consumida_{año1;mes\ 2} - Vapor\ de\ agua\ en\ gas_{año1;mes\ 2}\right) \cdot \frac{1}{12} + Peso\ lluvia_{año\ 1;mes\ 2} \cdot \frac{10}{12}$$

Mientras que el *Peso Seco de RS al final del año* se determina como:

$$Peso\ Seco\ RS\ fin\ año_{año1;mes\ 2} = \left[Peso\ Seco\ RS\ fin\ año_{año1;mes\ 1} - \left(Biogas\ producido_{año\ 1;mes\ 1} - Agua\ consumida_{año1;mes\ 1}\right)\right] \cdot \frac{1}{12} + \left[Peso\ seco\ RS - \left(Biogas\ producido_{año\ 1;mes\ 2} - Agua\ consumida_{año1;mes\ 2}\right)\right] \cdot \frac{1}{12}$$

Para determinar el *Agua en los RS* generado el mes 1 del año 2 se sustituye el *Contenido de humedad* por el *lixiviado* generado a partir de la porción de residuos dispuesta el primer mes de construcción del nivel 2, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Agua\ en\ los\ RS_{N1;año\ 2;mes\ 1} = \left(Agua\ retenida_{año\ 1;mes\ 12} + lixiviado_{N2;año\ 2;mes1} - Agua\ consumida_{año2;mes\ 1} - Vapor\ de\ agua\ en\ gas_{año2;mes\ 1}\right) \cdot \frac{1}{12} + \left(Agua\ retenida_{año\ 1;mes\ 12} + Peso\ infiltración_{año\ 2;mes\ 1} - Agua\ consumida_{año2;mes\ 1} - Vapor\ de\ agua\ en\ gas_{año2;mes\ 1}\right) \cdot \frac{11}{12}$$

Para determinar el *Peso Seco de RS al final del año* el primer mes del 2do año en el nivel 1, se emplea la siguiente ecuación:

$$Peso\ Seco\ RS\ fin\ año_{año2;mes\ 1} = Peso\ Seco\ RS\ fin\ año_{año1;mes\ 12} - \left(Biogas\ producido_{año\ 2;mes\ 1} - Agua\ consumida_{año2;mes\ 1}\right)$$

Repitiendo el razonamiento a los siguientes meses de cada nivel, se logra determinar el lixiviado generado mensualmente.

En los gráficos a continuación se presentan los resultados obtenidos.

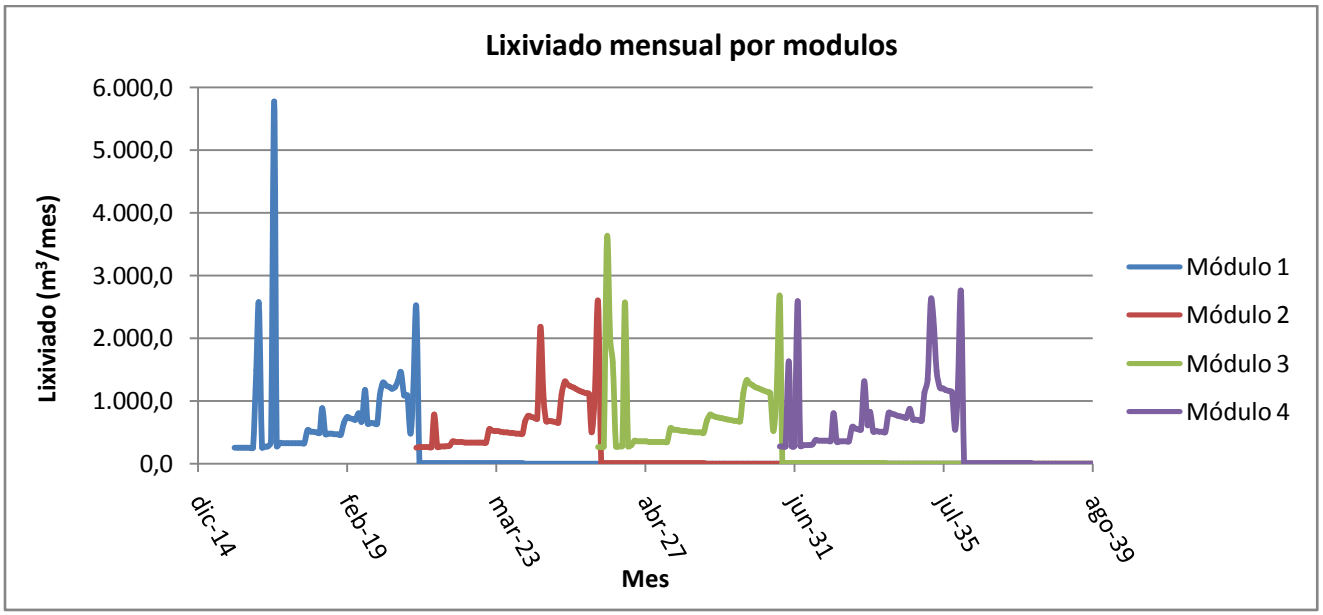


Gráfico 3.- Resultados del lixiviado mensual por módulo

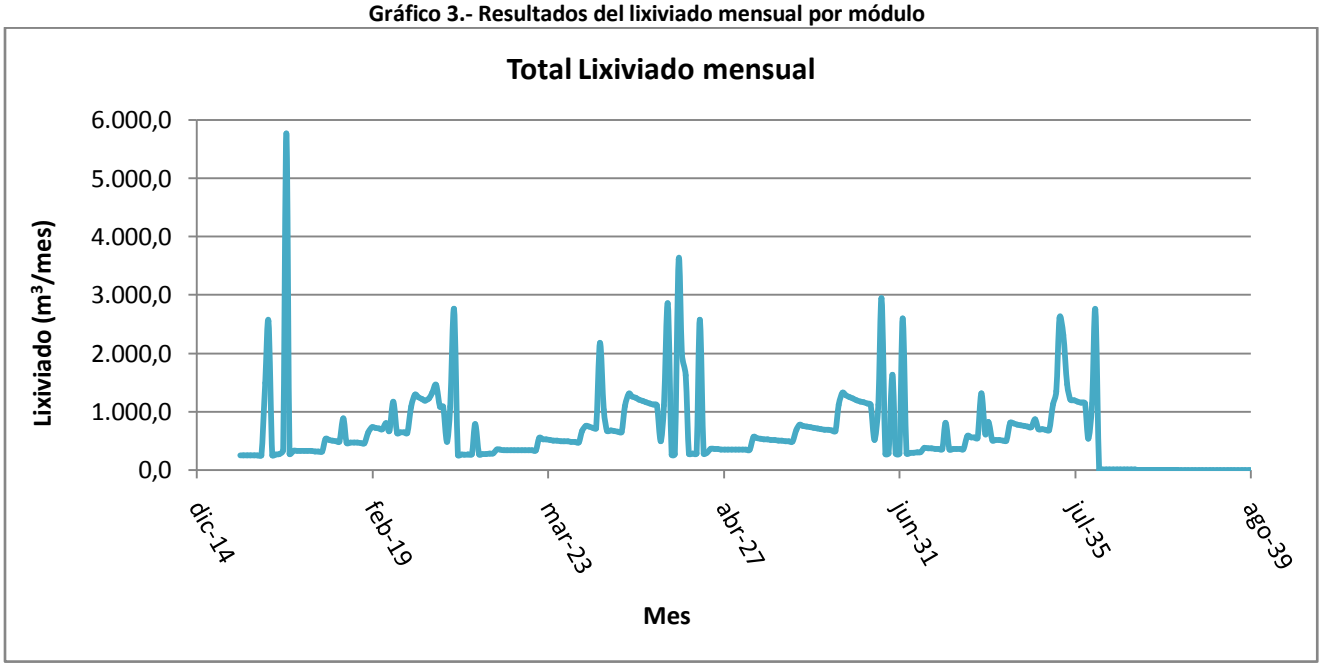


Gráfico 4.- Resultados del lixiviado mensual total

5 Sistema de recolección de lixiviado

El sistema de recolección tiene una estructura de espina de pescado, conformada por tuberías secundarias que alimentan a una principal. Cada módulo cuenta con un sistema de dos tuberías principales y cada una de ellas es alimentada por 7 tuberías secundarias

Se definieron los diámetros en ϕ160 y ϕ110 para las conducciones principales y para las secundarias, respectivamente.

Las tuberías principales descargan en colectores ubicados fuera del módulo, que conducen el lixiviado hacia la planta de tratamiento. Inicialmente se supuso el diámetro del colector de ϕ250, y luego se verifico su funcionamiento, como se describe en la Sección 5.1.4.

5.1 Diseño de sistema

Se determinó para cada tubería el caudal máximo capaz de conducir (a sección llena), asumiendo los siguientes parámetros:

Tipo de Conducción	Pendiente (%)	Diámetro (mm)	y/D	Q máximo (m^3/s)	v (m/s)
Principal	0,5	160	1	0,017	0,8
Secundaria	1,0	110	1	0,009	0,9

Tabla 10.- Máximo caudal por tubería

5.1.1 Tiempo de desagote para avenida de diseño

Se utilizó una tormenta de diseño de 25 años de período de retorno para verificar el funcionamiento del sistema con las tuberías principales y secundarias propuestas inicialmente.

La verificación se realizó para la etapa de operación de los módulos más desfavorable, es decir cuando se encuentran excavados y comenzando el llenado del primer nivel. Para ello se tomó el área superficial, y se supuso que la duración de la tormenta de Tr 25 era de 20 minutos. En función del caudal determinado se calculó el volumen acumulado dentro del módulo producto de la tormenta de diseño[6]. En la Tabla 11 se presentan los resultados para cada módulo.

$P_{3,10}$ (mm)	Duración (hs)	$P_{d,Tr,p}$ (mm)	Coeficiente de escorrentía	Intensidad (mm/h)
86	0,33	38,06	1	114,2

Modulo	Área superficial (m^2)	Caudal (m^3/s)	Volumen acumulado (m^3)
1	25.039	0,79	953,0
2	25.835	0,82	983,3
3	26.657	0,85	1014,6
4	27.506	0,87	1046,9

Tabla 11.- Cálculos para avenida de diseño

A partir de las capacidades determinadas previamente (ver Tabla 10), y en función de la cantidad de conducciones presentes en el sistema de drenaje de cada módulo, se determinó el tiempo de desagote para la avenida de diseño. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

[6] Nota: a modo de simplificar los cálculos para determinar el volumen acumulado, se despreciaron las pendientes internas en los taludes del modulo y la pendiente longitudinal dentro del mismo.

TIPO DE CONDUCCIÓN		PRINCIPAL	
Modulo	**Caudal lluvia por conducción (m^3/s)**	**Volumen acumulado (m^3)**	**Tiempo desagote avenida (h)**
1	0,397	952,968	8,0
2	0,410	983,276	8,2
3	0,423	1014,564	8,5
4	0,436	1046,865	8,7

TIPO DE CONDUCCIÓN		SECUNDARIA	
Modulo	**Caudal lluvia por dren (m^3/s)**	**Volumen acumulado (m^3)**	**Tiempo desagote avenida (h)**
1	0,057	68,07	2,2
2	0,059	70,23	2,3
3	0,060	72,47	2,3
4	0,062	74,78	2,4

Tabla 12.- Tiempo de desagote por tubería para avenida de diseño

Como se puede observar de la Tabla 12la hidráulica del sistema es controlada por las conducciones principales. Por lo tanto en caso de suceder una tormenta como la empleada para el cálculo, el sistema tardaría entre 8 y 9 horas aproximadamente para desagotar la avenida y durante dicho período de tiempo las conducciones principales trabajarán a sección llena.

5.1.2 Verificación de la capacidad de conducción

A partir del cálculo anterior, se dedujo que las conducciones principales actúan como estructura de control en caso de que ocurra una tormenta considerable y dichas tuberías deban trabajar a presión.

Por otro lado, los colectores que reciben el caudal aportado por las dos conducciones principales y lo conducen hasta la planta de tratamiento deben funcionar por gravedad a sección libre. Con lo cual se verificó que con el diámetro propuesto y el caudal máximo capaz de desagotar las conducciones principales (ver Tabla 10) dichos colectores no entren en carga.

Tubería hacia cámara de rebose	
Diámetro(m)	0,25
Capacidad (y/D)	**60%**
Tirante (m)	0,15
Pendiente (m/m)	0,004
Numero de Manning	0,010
Velocidad (m/s)	1,07
Caudal (m^3/s)	0,033

Tabla 13.- Verificación del funcionamiento del colector a tratamiento

En el caso que ambas tuberías principales se encuentren funcionando a sección llena y conduciendo el máximo caudal admisible, se observa que para el diámetro y la pendiente

definidas para el colector, el mismo alcanza una capacidad de funcionamiento de aproximadamente el 60 % lo cual considera aceptable.

Se verificó el régimen de funcionamiento en dicha tubería, a partir de la determinación del tirante crítico: $y_{critico} = 0{,}147\ m$
Como se puede observar de los resultados obtenidos, el régimen de flujo dentro de la tubería es del tipo Subcrítico, con lo cual el flujo es gobernado desde aguas abajo. La tubería descarga de forma libre

5.1.3 Verificación para el caudal de lixiviado

Se verificó las capacidades de funcionamiento del sistema de drenaje a partir del caudal máximo generado en tiempo seco, es decir $Q_{max,TS}$=39,1 m^3/d.

Conducción principal	
Diámetro(m)	0,16
Capacidad (y/D)	**15%**
Tirante (m)	0,02
Pendiente (m/m)	0,005
Numero de Manning	0,01
Velocidad (m/s)	0,43
Caudal (m^3/s)	2,26E-04

Tabla 14.- Verificación del funcionamiento de la conducción principal

Drenes secundarios	
Diámetro(m)	0,11
Capacidad (y/D)	**18%**
Tirante (m)	0,02
Pendiente (m/m)	0,01
Numero de Manning	0,010
Velocidad (m/s)	0,53
Caudal (m^3/s)	3,23E-05

Tabla 15.- Verificación del funcionamiento del dren secundario

Colector hacia planta de tratamiento	
Diámetro(m)	0,25
Capacidad (y/D)	**7%**
Tirante (m)	0,02
Pendiente (m/m)	0,004
Numero de Manning	0,010
Velocidad (m/s)	0,31
Caudal (m^3/s)	4,53E-04

Tabla 16.- Verificación del funcionamiento del colector a tratamiento

5.1.4 Verificación estructural de las conducciones

La conformación del sistema de captación y conducción de lixiviados fue detallada en la Sección 4 de la Memoria Descriptiva.

En esta sección se detalla el cálculo realizado para verificar las condiciones estructurales a las cuales se encuentran sometidas las tuberías destinadas al transporte de lixiviado dentro del relleno sanitario. En particular se estudió la deformación que tendrán dichas tuberías, y que la misma no supere el 5% de su diámetro.

La verificación fue realizada tanto para los drenes secundarios como para las conducciones principales, empleando las características detalladas en la Tabla 17.

TUBERÍAS	
Material	PVC
Conducción principal	
Altura Material de relleno (m)	0,3
ϕ nominal (mm)	160
ϕ interno (mm)	153,3
Espesor (mm)	6,7
Relación diámetro/espesor: D_r	24
Dren secundario	
Altura Material de relleno (m)	0,15
ϕ nominal (mm)	110
ϕ interno (mm)	105,6
Espesor (mm)	4,4
Relación diámetro/espesor: D_r	25

Tabla 17.- Características de las conducciones

Las tuberías son instaladas en zanjas, en donde las solicitaciones a las cuales se encuentran sometidos los caños son tanto internas como externas.

Las solicitaciones internas a la tubería son derivadas de fenómenos hidráulicos en la conducción como:

- Presión interna en régimen permanente
- Sobrepresión interna, variable entre valores positivos y negativos, del régimen transitorio (“Golpe de Ariete”)

Por otro lado, las solicitaciones externas son derivadas de factores externos a las tuberías, tales como:

- Carga del material de relleno de la zanja sobre la tubería
- Carga dinámica de tránsito vehicular.

Las tuberías de drenaje al transportar el lixiviado no estarán sujetas a presiones internas, por lo que el criterio de verificación es en base a las “cargas externas”.

En la imagen de la Figura 5 se esquematizan las solicitaciones para una tubería colocada en zanja.

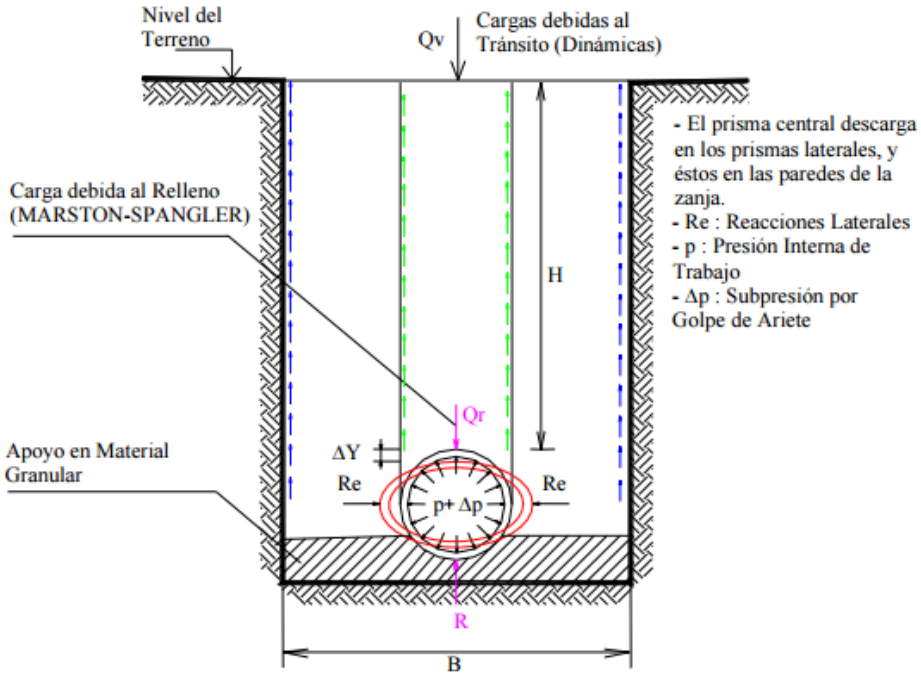


Figura 5.- Solicitaciones sobre una tubería enterrada en zanja

La capacidad de soportar cargas por parte de un caño enterrado dependerá de:

- Resistencia intrínseca del caño, y consecuentemente, su capacidad relativa de deformación
- La magnitud y distribución de cargas alrededor del caño
- El soporte brindado por el terreno circundante

Los dos primeros factores están vinculados directamente con el tipo de suelo del relleno y el grado de compactación del suelo de apoyo y lateral, es decir el grado de rigidez relativo entre caño y suelo de apoyo.

La teoría tradicional de Marston, permite evaluar las magnitudes de las cargas debidas al relleno para tuberías flexibles.

5.1.4.1 Ancho de zanja

El ancho de la zanja juega un rol importante, puesto que la fricción entre el relleno y el material de suelo no alterado al excavarla, tienen una influencia en las cargas actuantes sobre el caño.

En zanja angosta, en la que el caño de diámetro externo D_e esta instalado en una zanja de ancho B, relativamente pequeño frente a D_e. Una vez instalado, se lo rellena hasta la tapada H tal como puede apreciarse en laFigura 6. En este caso, se produce el mencionado “efecto de arco”,

provocando que las cargas de relleno del prisma central (que descarga sobre la tubería) sean aliviadas, en parte, en las paredes laterales.

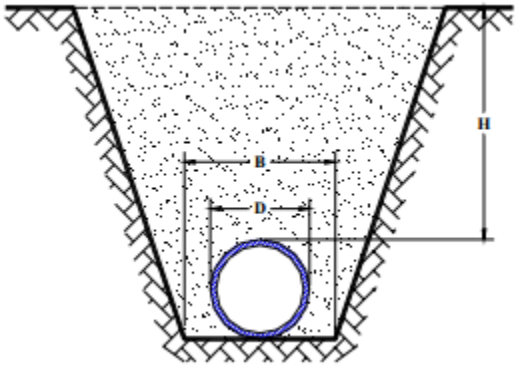


Figura 6.- Caño en condición de "zanja angosta"

Según Spangler la validez del concepto de "zanja angosta" debe verificar la siguiente relación:

$$B_{max} = 3 \cdot D$$

Se verifico para ambas tuberías, obteniendo los resultados de la Tabla 18.

VALIDEZ DEL CONCEPTO DE "ZANJA ANGOSTA"	
Conducción principal (D=160 mm)	
Ancho zanja: B (m)	0,42
Splanger: B_{max}= 3D ---->B_{max}	0,48
Dren secundario (D=110 mm)	
Ancho zanja: B (m)	0,27
Splanger: B_{max} = 3D ---->B_{max}	0,33

Tabla 18.- Verificación del concepto de "zanja angosta"

5.1.4.2 Carga del suelo sobre la tubería

La carga de relleno según la Teoría de Marston para tuberías flexibles en zanjas angostas es:

$$Q_R = C_D \cdot \gamma \cdot B \cdot D$$

Siendo

- Peso específico del material de relleno: γ_{arena}= 1.500 kg/m^3)
- Ancho de la zanja: B (m)
- Diámetro nominal de la tubería: D (m)
- Coeficiente de descarga: C_D

$$C_D = \frac{1 - e^{-\frac{2k\mu' H}{B}}}{2 \cdot k \cdot \mu'}$$

Siendo:

- coeficiente de Empuje Activo de Rankine: k
- Altura del material de relleno: H (m)
- Coeficiente de rozamiento entre el relleno y el material inalterado de las paredes de la zanja: μ'

$$\mu' = tg(\varphi)$$

- Ángulo de fricción interna del suelo: φ_{arena} = 30°

Para el cálculo se consideró arena sin saturar compactada, para la cual el parámetro k μ' = 0,192

CARGAS POR LOS MATERIALES SOBRE LA TUBERÍA		
Parámetro	**Conducción principal (D=160 mm)**	**Dren secundario (D=110 mm)**
Altura del material de relleno: H (m)	0,3	0,15
Coeficiente de descarga (Cd)	0,62	0,50
Carga del relleno: Qr (kg/m)	**63,0**	**22,3**

Tabla 19.- Resultado de la Carga del relleno (Qr)

5.1.4.3 Carga del tránsito vehicular sobre la tubería

Los vehículos que transitan sobre el material de relleno por sobre la tubería, producen una acción dinámica que es transmitida hacia la misma.

Esta sobrecarga puede calcularse con suficiente precisión considerando que una carga Q aplicada sobre la superficie se transmite, en profundidad, según un tronco de pirámide cuyas caras laterales forman un ángulo de 35° con la vertical.

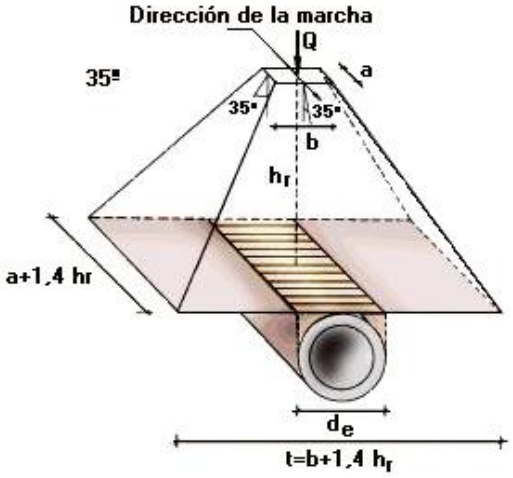


Figura 7.- Esquema de acción del tránsito vehicular

Para el cálculo se emplean las características de los camiones recolectores. Los equipos recolectores fueron seleccionados a partir del catálogo de productos de la empresa argentina SCORSA, en particular se optó por el modelo CS6 (ver Tabla 20).

Características del camión recolector	
Peso del camión vacío (kg)	5500
Peso residuos transportados (kg)	17000
Tipo de eje	Un eje trasero
Numero de ruedas	4
Ancho de rueda (m)	0,3
Distancia entre ejes de ruedas: c (m)	2

Tabla 20.- Características del camión recolector

Se considera que el vehículo circula según la dirección de la tubería, por ser este el caso más desfavorable.

La carga producida por el camión se aplica en el rectángulo formado por el ancho de la rueda y el largo que se apoya de esta. Por lo tanto, la carga puntual producida por el vehículo se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Q_{puntual} = \frac{Peso\ camión\ vacío + Peso\ residuos\ transportados}{N°\ ruedas} = 5625\ kg$$

Dado que en la superficie de la tubería interactúa la carga ejercida por más de una rueda, el efecto de las mismas se superpone a partir de determinada profundidad. La superposición comienza a una profundidad h_s, definida por la siguiente ecuación:

$$h_s = \frac{c}{1{,}4} = 1{,}43\ m$$

El valor empleado para *c* se presenta en la Tabla 20.

La carga producida sobre la tubería depende de la relación entre h_s y la altura del material de relleno: H.

Si $H<h_s$, como es el caso, no existe superposición de efectos y por lo tanto la carga se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$Q_t = \frac{C_i \cdot Q_{puntual} \cdot D_e}{L_e \cdot t}$$

Siendo:

$$t = b + 1{,}4 \cdot H$$

- Carga producida sobre la tubería: Q_t(kg/m)
- Coeficiente de impacto: C_i
- Diámetro externo de la tubería: D_e(m)
- Ancho de la rueda del camión: b(m)
- Longitud eficaz: L_e(m)

$$L_e = 1 + 1{,}4 \cdot H + 1{,}05 \cdot D_e$$

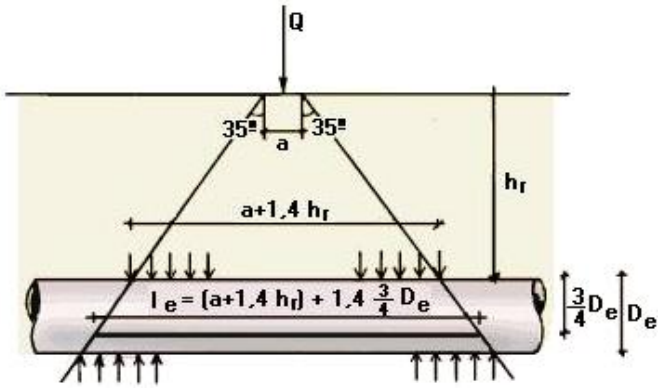


Figura 8.- Esquema del cálculo de la carga por el tránsito vehicular

Como valor del coeficiente de impacto C_i, de acuerdo con la American Concrete Pavement Association (ACPA), se adopta el dado por la condición de la Tabla 21.

H (m)	C_i
≤ 0,30	1,30
≤ 0,60	1,20
≤ 0,90	1,10
≥ 0,90	1,00

Tabla 21.- Coeficiente Ci en función de la altura del material de relleno (H)

En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos.

CARGAS POR EL TRANSITO VEHICULAR SOBRE LA TUBERÍA		
Parámetro	**Conducción principal (D=160 mm)**	**Dren secundario (D=110 mm)**
Diámetro externo tubería: De (m)	1,667	1,144
Longitud eficaz (Le)	3,2	2,4
t (m)	0,7	0,51
Carga vehicular sobre la tubería: Qt (kg/m)	**5340,3**	**6802,8**

Tabla 22.- Resultado de la Carga por el tránsito vehicular (Qt)

5.1.4.4 Deformación de la tubería

Para el cálculo de la deformación de la tubería se utiliza la teoría de Sangler, en donde la misma se calcula a partir de las cargas aplicadas sobre la tubería utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta y = \frac{(D_L \cdot Q_r + Q_t) \cdot k}{\frac{2 \cdot E}{3 \cdot (D_r - 1)^3} + 0{,}061 \cdot E'}$$

Siendo:

- Deformación de la tubería: Δy(m)
- Peso de la carga producida por la disposición del material de relleno sobre la tubería: Q_r(kg/m)
- Peso de la carga móvil producida por el tránsito vehicular sobre la tubería: Q_t(kg/m)
- Coeficiente de apoyo: k
- Coeficiente de auto compactación: D_L
- Módulo de elasticidad del material de tubería: E(kg/m^2)
- Módulo de reacción del suelo: E' (kg/m^2)
- Relación diámetro/espesor de la tubería: D_r

El apoyo de la tubería corresponde al tipo de Apoyo B, donde la tubería se apoya sobre una capa de arena compacta. A pesar de esto, con la finalidad de prever posibles errores durante la construcción, para el cálculo de la deformación de la tubería se considera que el apoyo es del Tipo C. Para este tipo de apoyo el coeficiente *k* vale 0,096.

Luego, para evaluar la deformación a largo plazo, se considera que el coeficiente D_L toma el valor de 1,5.

Por otro lado, ambas tuberías son de PVC, siendo su módulo de elasticidad de 2,8x10^8 kg/m^2. El módulo de reacción del suelo E' depende del material y su grado de compactación; en este caso se consideró que vale 3,0x10^5 kg/m^2, correspondiente a suelos arenosos.

En función de los parámetros mencionados, se obtuvieron los siguientes resultados.

DEFORMACION DE LA TUBERÍA		
Parámetro	**Conducción principal (D=160 mm)**	**Dren secundario (D=110 mm)**
Carga por los materiales sobre tubería: Qr (kg/m)	63,0	22,3
Carga por tránsito vehicular sobre tubería: Qt (kg/m)	5340,3	6802,8
Relación diámetro/espesor: Dr	24	25
Deformación de la tubería: Dy (m)	**0,015**	**0,021**
5% Diámetro nominal (m)	0,08	0,055

Tabla 23.- Resultados de la deformación de las tuberías

5.1.4.5 Aplastamiento admisible

La condición de verificación de las tuberías flexibles es que la deformación de la misma no supere el 5% de su diámetro.

Se determinó que, asumiendo que la altura del relleno de 30 y 15 cm para las tuberías principales y secundarias, respectivamente, verifican la condición de aplastamiento.

6 Tratamiento de lixiviado

6.1 Caracterización del efluente

6.1.1 Dilución en eventos de lluvia

Con el fin de cuantificar el efecto de la dilución, se calculó la serie de caudales base, realizando el balance de lixiviado sin precipitaciones asociadas. Por otro lado, se determinó la serie de caudales de lixiviados asociados a las lluvias (caudal lluvia), para la serie de precipitación seleccionada, como el caudal de lixiviado total menos el caudal base. Este caudal lluvia es generado por la infiltración de la lluvia por la cobertura.

La serie de caudales base, no es constante, sino que depende de la etapa de operación del relleno, las concentraciones asociadas a cada situación también son diferentes, dependiendo principalmente de la fase de la descomposición en la que nos encontremos. Para definir dichas concentraciones se tuvieron en cuenta las series de datos en tiempo seco de los RSa de Las Rosas y Felipe Cardoso, ver Sección 5.7.1.1. Memoria Justificativa, y se seleccionaron tres situaciones de concentraciones de DBO y caudales representativas (ver Tabla 24)

TIEMPO SECO		
	Caudal (m^3/d)	Concentraciones DBO (mg/L)
Mínimo	8,9	5.000
Medio	16,8	2.500
Máximo	39,1	800

Tabla 24.- Caudales y concentraciones de diseño

Para la serie de datos de caudales base mensuales se asignó a cada caudal una concentración de DBO, a partir de los rangos definidos y el siguiente razonamiento:

$$Si\ Q_{base,i} \geq Q_{lim,sup} \rightarrow C_{DBO,i} = 800\ mg/L$$

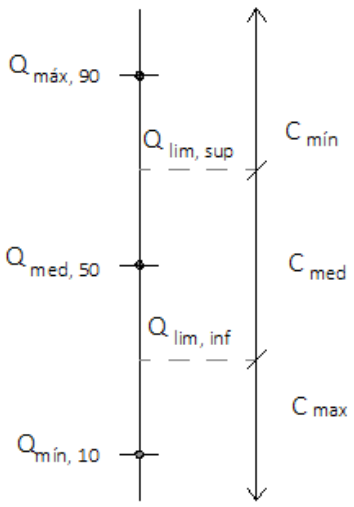
$$Si\ Q_{lim,inf} < Q_{base,i} < Q_{lim,sup} \rightarrow C_{DBO,i} = 2500\ mg/L$$

$$Si\ Q_{base,i} \leq Q_{lim,inf} \rightarrow C_{DBO,i} = 5000\ mg/L$$

Siendo:

$$Q_{lim,inf} = \frac{Q_{máx,90} + Q_{med,50}}{2} = 838\ m^3/d$$

$$Q_{lim,sup} = \frac{Q_{med,50} + Q_{mín,10}}{2} = 385\ m^3/d$$



Luego, se calculó la carga en tiempo seco, para cada mes como:

$$Carga_{TS,i}[kgDBO/d] = \frac{Q_{base\ ,i}[m^3/mes]}{30\ d} \cdot \frac{C_{DBO\ ,i}[mg/L]}{1000}$$

Asumiendo que la carga permanece constante, se calculó la concentración diluida asociada al caudal total, que incluye el caudal de los eventos de lluvia que se dan a lo largo de los meses.

$$Concentración_{Diluida\ ,i}[mgDBO/L] = Carga_{TS,i}[kgDBO/d] \cdot 1000 / \left(\frac{Q_{total\ ,i}[m^3/mes]}{30\ d}\right)$$

La mínima concentración obtenida para la serie de precipitaciones considerada, fue de 287 mgDBO/L, asociada a una lluvia de 757,5 mm/mes que se da en Febrero del 2017 (segundo año de operación del módulo 1), correspondiente al año 1984 de la serie histórica seleccionada. Por lo tanto, para los eventos presentes en la serie considerada no es posible realizar el vertido directo al curso de agua.

6.2 Diseño del sistema de tratamiento

Con el fin de evitar que las variaciones de caudales y concentraciones afecten negativamente los procesos biológicos que tienen lugar en las lagunas, se definieron tres configuraciones de tratamiento detalladas en la Sección 5.7.2.de la Memoria Justificativa

Se presentará el diseño del tratamiento, siguiendo la metodología que fue utilizada, partiendo del caso más simple donde no se consideran los eventos de lluvia (tiempo seco) hacia casos más complejos donde se incorporan los efectos de eventos de diferente magnitud (tiempo lluvioso).

Sin embargo, el primer capítulo de esta sección describe el dimensionamiento del sistema de entrada a la planta de tratamiento, en el cual ocurre la división del flujo cuando ocurren eventos de precipitación.

6.2.1 Ingreso a la planta de tratamiento

Se optó por una cámara de rebose para la derivación de parte del caudal hacia la laguna anaerobia y parte hacia la laguna de ecualización.

El ingreso a la cámara de rebose está dado por un caño proveniente del sistema de recolección de lixiviado, que presenta las características de la Tabla 25.

Características tubería a cámara de rebose	
Largo (m)	82,1
Diámetro (mm)	0,25
Capacidad (y/D)	6,8%
y_{normal}(m)	0,017
Pendiente (%)	0,4%
Rugosidad de Manning	0,01
Velocidad (m/s)	0,31
Caudal máximo (m^3/s)	0,00045

Tabla 25.- Características del caño de entrada a la cámara de rebose

Se verificó el régimen de funcionamiento en dicha tubería, a partir de la determinación del tirante crítico:

$$y_{critico} = 0{,}0164\ m$$

Como se puede observar de los resultados obtenidos, el régimen de flujo dentro de la tubería es del tipo Subcrítico. La descarga de la tubería a la cámara de rebose se da de forma libre.

En la sección 5.1.2 se determinó el funcionamiento de la tubería de entrada a la cámara de rebose cuando conduce el máximo caudal capaz de drenar el sistema de recolección de lixiviados (ver Tabla 13).

La cámara de rebose fue diseñada para que funcione descargando de forma ahogada el máximo caudal en tiempo seco a la laguna anaerobia por un orificio y que el tirante asociada a dicha descarga por la tubería de salida sea el tirante normal.

La ecuación empleada para la descargada ahogada por orificio es:

$$u = C_d\sqrt{2 \cdot g(H - a)}$$

Siendo:

u (m/s): velocidad en el orificio

C_d: coeficiente de descarga (0,6)

g (m/s^2): aceleración gravitatoria

H (m): Altura de agua en la cámara, medida desde el zampeado de la cámara hasta el pelo de agua en la tubería de salida.

a (m): radio del orificio

El proceso para determinar el diámetro del orificio fue iterativo, fijando el caudal de salida por el mismo como el máximo caudal de diseño del sistema de tratamiento en tiempo seco, es decir:

$$Q_{max} = 0.00045\ m^3/s$$

A partir del caudal y del diámetro supuesto inicialmente se determinó el área del orificio y luego la velocidad del mismo como:

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

Luego aplicando la ecuación de descarga por orificio ahogado se despejo el valor de H. Se itera haciendo variar el valor del diámetro del orificio hasta que el valor de H sea igual o mayor al tirante normal por la tubería de salida.

En la Tabla 26 se presentan las características de la tubería de salida de la cámara de rebose, y el valor hallado del tirante normal. El caudal empleado para determinar el tirante es el máximo capaz de conducir la tubería de entrada a la cámara (Q=2873,4 m^3/d)menos el caudal de salida por el orificio ($Q_{max}^{L.An}$=39,1 m^3/d). El caudal de ingreso a la cámara es regulado por las conducciones principales dentro de los módulos que actúan como estructura de control en el diseño hidráulico del sistema, con lo cual dicho caudal es el máximo capaz de ingresar a la cámara. Por lo tanto resulta que el caudal máximo enviado a la planta de ecualización es de

$$Q_{max}^{L.Ecualizacion} = 0.0328\ m^3/s$$

Características tubería a laguna de Ecualización	
Diámetro (mm)	0,25
Capacidad(y/D)	60%
$Caudal_{max}$ a L. Ecualización (m^3/s)	0,0328
$tirante_{normal}$(m)	0,15
Pendiente (%)	0,4%
Rugosidad de Manning	0,01
Velocidad (m/s)	1,07

Tabla 26.- Características del caño de salida de la cámara de rebose (hacia L. Ecualización)

Se verificó el régimen de funcionamiento en dicha tubería, a partir de la determinación del tirante crítico:

$$y_{critico} = 0{,}147\ m$$

Como se puede observar de los resultados obtenidos, el régimen de flujo dentro de la tubería es del tipo Subcrítico. La descarga de la tubería en la laguna de ecualización se da de forma libre.

Por lo tanto, los valores obtenidos para el diseño de la cámara de rebose se presentan en la Tabla 27, siendo *x* la distancia desde el zampeado de la cámara hasta el zampeado de la tubería de salida (hacia la laguna de ecualización).

Orificio						
Diámetro (m)	Área (m^2)	Caudal (m^3/s)	Velocidad (m/s)	Cd	H (m)	x (m)
0,020	0,000	0,0005	1,4	0,6	0,304	0,155

Tabla 27.- Parámetros de diseño del orificio de salida de la cámara de rebose

6.2.2 Tiempo seco

El caudal generado en de ausencias de lluvia, es el caudal base que se presenta en el Gráfico 5Gráfico 5. Para realizar el diseño de las lagunas se tuvieron en cuenta las tres situaciones de caudal y concentración plantadas en la Sección 6.1. Por lo tanto, los parámetros de diseño de las lagunas se presentan en la Tabla 28.

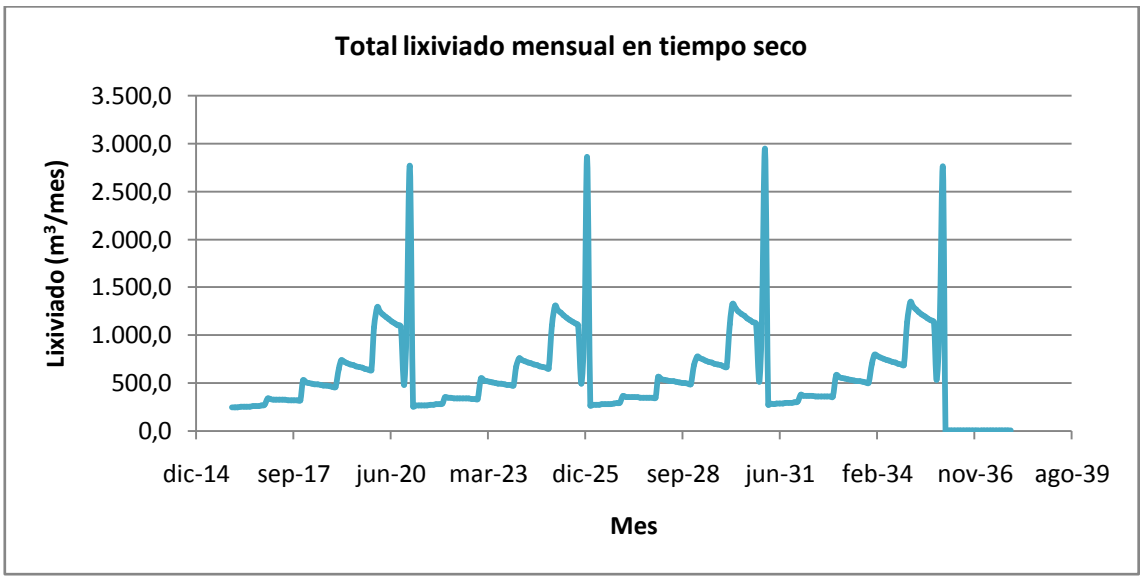


Gráfico 5.- Serie de caudales base

TIEMPO SECO			
Caudales de diseño (m^3/d)		Concentraciones de diseño (mg/L)	Cargas de diseño (kg $DBO_{5,20}$ /d)
Mínimo	8,9	800	44,5
Medio	16,8	2.500	41,9
Máximo	39,1	5.000	31,3

Tabla 28.- Parámetros de diseño, tiempo seco

6.2.2.1 Laguna Anaerobia

La laguna anaerobia fue diseñada con geometría cuadrada de profundidad 2,5 m y tiempos de retención mayores a tres días, según lo definido en la Sección 5.7.5.de la Memoria Justificativa.

La metodología adoptada para el diseño fue la siguiente:

1. Se supone un tiempo de retención para el caso Máximo ($Q_{diseño}$=39,1m^3/d)
2. Se calcula el volumen de la laguna como: $V_{laguna} = Q_{max} \cdot t_{r,max}$
3. Se calcula el tiempo de retención para el caso Medio y Mínimo como: $t_r = V_{laguna} / Q$
4. Se calcula la carga volumétrica para cada caso como: $L_v = L/V_{laguna}$
5. Se verifica que en todos los casos la carga volumétrica se encuentre dentro del rango admisible (0.1 – 0.3 kgDBO/m^3.d). De encontrase alguno fuera del rango, se supone nuevamente un tiempo de retención para el caso Máximo y se realiza de nuevo el procedimiento.

Las dimensiones obtenidas se presentan en la Tabla 29.

Dimensiones	
Volumen (m^3)	313,0
Área superficial (m^2)	104,3
Relación Ancho/Largo	1
Ancho = Largo (m)	10,2

Tabla 29.- Dimensiones laguna anaerobia

Luego para calcular la remoción en DBO, se utilizó el siguiente modelo matemático que se basa en la cinética del proceso de remoción de materia orgánica suponiendo mezcla completa en la laguna. Cabe destacar, que el modelo representa bien la situación siempre y cuando todos los parámetros (t_r y L_v) se encuentren dentro de los rangos recomendados.

$$DBO_e = DBO_0 / \left[K \cdot \left(\frac{DBO_e}{DBO_0} \right)^n \cdot t_r + 1 \right]$$

Dónde:

- Concentración de DBO del efluente: DBOe(mg/l)
- Concentración de DBO del afluente: DBOo(mg/l)
- Constante de degradación para mezcla completa: K(días^{-1})
- Tiempo de retención hidráulica: tr(días)
- Constante adimensional: n

Las constantes K y n dependen de la temperatura y se deben evaluar experimentalmente, teniendo en cuenta que para 22°C el valor usual de K=6 y el de n=4.8. Se calculan K y n suponiendo una relación lineal, para la temperatura media del agua en invierno para Mercedes de aproximadamente 15 °C, obteniéndose: $K_{15°C}$ = 4.1 y $n_{15°C}$ =3,3

Se determinó la DBO de salida de la laguna para los casos de diseño y luego se corrigió imponiendo una eficiencia de remoción máxima del 55 %.

Los resultados obtenidos de laguna para los caudales de diseño en tiempo seco se presentan en la Tabla 30.

TIEMPO SECO			
Laguna anaerobia			
Caudal de diseño	Mínimo	Medio	Máximo
Tiempo de retención (días)	35	19	8
Carga entrada: Lo[1] (kgDBO/d)	44,5	41,9	31,3
Carga volumétrica de aplicación: Lv (kg DBO/m^3.dia)	0,14	0,13	0,10
Remoción de DBO			
Concentración de entrada: DBOo[1](mg/L)	5.000	2.500	800
Concentración de salida: DBOe[1] (mg/L)	1443	825	315
Eficiencia remoción	71%	67%	61%
Eficiencia corregida	55%	55%	55%
Concentración de salida corregida: DBOe (mg/L)	2250	1125	360
Carga de salida: Le[1] (kg DBO/d)	20,0	18,9	14,1

Tabla 30.- Laguna anaerobia, tiempo seco

6.2.2.2 Lagunas Facultativas

Las dos lagunas facultativas fueron diseñadas con geometría rectangular con relación largo ancho L/B = 2, profundidad útil 1.5 m y tiempos de retención mayores a 15 días, según lo definido en la Sección 5.7.6.de la Memoria Justificativa.
El procedimiento para el diseño es análogo al caso de la laguna anaerobia:

1- Se supone un tiempo de retención para el caso Máximo ($Q_{diseño}$=39,1m^3/d)
2- Se calcula el volumen de la laguna como: $V_{laguna} = Q_{max} \cdot t_{r,max}$
3- Se calcula el tiempo de retención para el caso Medio y Mínimo como: $t_r = V_{laguna} / Q$
4- Se calcula la carga superficial para cada caso como: $L_s = L/A_{laguna}$
5- Se verifica que en todos los casos la carga superficial se encuentre dentro del rango admisible (80 – 120 kgDBO/ha.d). De encontrase alguno fuera del rango, se supone nuevamente un tiempo de retención para el caso Máximo y se realiza de nuevo el procedimiento.

Laguna número 1:

Para la primera laguna las dimensiones obtenidas se presentan en la Tabla 31.

Dimensiones	
Volumen (m^3)	2543
Área superficial (m^2)	1695
Profundidad útil (m)	1.5
Relación largo/ancho	2
Ancho (m)	29
Largo (m)	58

Tabla 31.- Dimensiones facultativa 1

Los modelos matemáticos que estiman la eficiencia de remoción dependen del tipo de flujo que tenga lugar en la laguna. En este caso se optó por flujo disperso, una condición intermedia entre el flujo pistón y mezcla completa. El flujo disperso es un caso más real, ya que la laguna no sigue exactamente los modelos ideales de mezcla completa o flujo pistón, estos sirven como límites dentro de los cuales se sitúan las lagunas en la realidad.

Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$DBO_e = DBO_0 \left(\frac{4 \cdot a \cdot e^{\frac{1}{2d}}}{(1+a)^2 \cdot e^{\frac{a}{2d}} - (1-a)^2 \cdot e^{-\frac{a}{2d}}} \right)$$

$$a = (1 + 4Ktd)^{1/2}$$

$$d = \frac{L/B}{-0.261 + 0.254(L/B) + 1.014(L/B)^2}$$

Dónde:

- Carga afluente total: DBOo (mg/l)
- Carga efluente soluble: DBOe (mg/l)
- Tiempo de retención hidráulica t (días)
- Coeficiente de disminución de la carga orgánica: K
- Número de dispersión: d
- Largo de la laguna: L (m)
- Ancho de la laguna: B (m)

El coeficiente de disminución de la carga orgánica, se calculó a partir de la fórmula original simplificada de Vidal (1983), para 20 °C:

$$K_{20°C} = 0.091 + 2{,}05 \times 10^{-4} \cdot L_s$$

Luego se corrigió para la temperatura media del agua en invierno para Mercedes, de 15 °C, a través de la siguiente ecuación:

$$K_T = K_{20°C} \cdot \theta^{(T-20)}$$

Siendo θ el coeficiente de temperatura =1.035

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 32.

TIEMPO SECO			
Laguna facultativa 1			
Caudal de diseño	Mínimo	Medio	Máximo
Tiempo de retención (días)	286	152	65
Carga entrada: Lo^1 (kg DBO/d)	20,0	18,9	14,1
Carga superficial de aplicación: Ls (kg DBO/m^2.dia)	0,0118	0,0111	0,0083
Remoción de DBO			
Concentración de entrada: $DBOo^2$ (mg/L)	2.250	1.125	360
Constante cinética a 20 °C: K	0,11	0,11	0,12
Constante cinética a temperatura t: K_t	0,09	0,09	0,10
d	0,5	0,5	0,5
a	7,2	5,3	3,5
Concentración de salida: $DBOe^2$ (mg/L)	1,2	5,9	17,7
Eficiencia remoción	100%	100%	97%
Eficiencia corregida	80%	80%	80%
Concentración de salidacorregida: DBOe(mg/L)	450	225	72
Carga de salida: Le^2 (kg DBO/d)	4,01	3,77	2,82

Tabla 32.- Laguna facultativa 1, tiempo seco

Laguna número 2:

El procedimiento para el diseño de la segunda laguna fue análogo al de la primera, las dimensiones y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 33 y en la Tabla 34, respectivamente.

Dimensiones	
Volumen (m^3)	587
Área superficial (m^2)	391
Profundidad útil (m)	1.5
Relación largo/ancho	2
Ancho (m)	14
Largo (m)	28

Tabla 33.- Dimensiones facultativa 2

TIEMPO SECO			
Laguna facultativa 2			
Caudal de diseño	Mínimo	Medio	Máximo
Tiempo de retención (días)	66	35	15
Carga entrada: Lo^2 (kg DBO/d)	4,0	3,8	2,8
Carga superficial de aplicación: Ls (kg DBO/m^2.dia)	0,0102	0,0096	0,0072
Remoción de DBO			
Concentración de entrada: $DBOo^3$ (mg/L)	450	225	72
Constante cinética a 20 °C: K	0,11	0,11	0,10
Constante cinética a temperatura t: K_t	0,09	0,09	0,09
d	0,5	0,5	0,5
a	3,5	2,7	1,9
Concentración de salida: $DBOe^3$ (mg/L)	20,0	30,0	25,8
Eficiencia remoción	96%	87%	64%
Eficiencia corregida	80%	80%	64%
Concentración de salida corregida: DBOe(mg/L)	90	45	26
Carga de salida: Le^3 (kg DBO/d)	0,8	0,8	1,0

Tabla 34.- Laguna facultativa 2, tiempo seco

6.2.3 Tiempo lluvia

6.2.3.1 Laguna de ecualización

El objetivo de la laguna de ecualización, es lograr amortiguar los picos de lixiviados generados en eventos de lluvia, permitiendo almacenar y bombear un caudal estable a la planta de tratamiento protegiendo al sistema de lagunas.

El máximo caudal conducido a la laguna de tratamiento por gravedad es el correspondiente al máximo de diseño del sistema en tiempo seco, que se encuentra controlado por la placa orificio ubicada en la cámara de rebose.

$$Q_{max\ ,TS} = 1173{,}6\ m^3/s$$

Para seleccionar el caudal de bombeo desde la laguna de ecualización a la anaerobia, se tuvieron en cuenta los criterios presentados en la Sección 5.7.4. de la Memoria Justificativa, resultado un caudal máximo de bombeo de:

$$Q_{max\ ,bomb} = 1326{,}4\ m^3/mes$$

Luego, el caudal máximo que puede ingresar a la laguna anaerobia está compuesto por el caudal de bombeo, desde la ecualización, y el caudal conducido por gravedad, desde la cámara de rebose.

$$Q_{máx,lluvia} = 2500\ m^3/mes$$

Para diseñar la laguna se realizó un balance de paso mensual a partir del lixiviado generado calculado a partir de la serie histórica de precipitación seleccionada.

El balance tiene cinco componentes:

- *Caudal a tratamiento por gravedad:*

Corresponde al caudal que ingresa por gravedad desde la cámara de rebose, por lo tanto, para el mes i:

$$Si\ Q_{lixiviado\ ,i} < Q_{max\ ,TS} \rightarrow Q_{gravedad\ ,i} = Q_{lixiviado\ ,i}$$

$$Si\ Q_{lixiviado\ ,i} > Q_{max\ ,TS} \rightarrow Q_{gravedad\ ,i} = Q_{max\ ,TS}$$

- *Caudal a tratamiento por bombeo:*

El caudal a tratamiento bombeado desde la ecualización queda definido en función del caudal de entrada, el caudal por gravedad en el mes i y el almacenamiento presente en la laguna del mes anterior (i-1), por lo tanto:

$$Si\ Q_{lixiviado\ ,i} + S_{i-1} - Q_{gravedad\ ,i} > Q_{max\ ,bomb} \rightarrow Q_{bombeo\ ,i} = Q_{max}$$

$$Si\ Q_{lixiviado\ ,i} + S_{i-1} - Q_{gravedad\ ,i} < Q_{max\ ,bomb} \rightarrow Q_{bombeo\ ,i} = Q_{lixiviado\ ,i} + S_{i-1} - Q_{gravedad\ ,i}$$

- *Balance mensual:*

El balance del mes i se determina como:

$$Balance_i = Q_{lixiviado\ ,i} + S_{i-1} - Q_{gravedad\ ,i} - Q_{bombeo\ ,i}$$

- *Caudal vertido hacia laguna anaerobia:*

Como se mencionó en la Sección 5.7.2.2. de la Memoria Justificativa, se prevé un vertido libre hacia la primera laguna facultativa en caso que la magnitud del evento sea tal que genere que el lixiviado que ingresa a la laguna supere la capacidad de bombeo. Por lo tanto la condición de vertido será la siguiente:

$$Si\ Balance_i > V_{Ecualizaci\ ón} \rightarrow Q_{Vertido\ ,i} = Balance_i - V_{Ecualizaci\ ón}$$

$$Si\ Balance_i < V_{Ecualizaci\ ón} \rightarrow Q_{Vertido\ ,i} = 0$$

- *Volumen almacenado en la laguna de ecualización:*

Por último, se calcula el volumen almacenado en el mes i en la laguna de ecualización:

$$S_i = Balance_i - Q_{Vertido\ ,i}$$

El volumen de la laguna de ecualización se determinó de manera que el vertido directo a la primera laguna facultativa se dé en ocasiones excepcionales. Las dimensiones determinadas se

presentan en la Tabla 35, para las cuales el vertido se da una única vez para la serie de datos considerada.

Dimensiones	
Largo (m)	30,0
Área (m2)	900,0
Profundidad (m)	2,0
Volumen (m3)	1.800,0

Tabla 35.- Dimensiones laguna ecualización

Balance diario:

A su vez, con el fin de evaluar el funcionamiento de la laguna de ecualización con un paso de tiempo menor y verificar su dimensionado realizado con paso mensual, se realizó el balance diario para el mes de Febrero del 2017, que corresponde al caso en que se da el vertido hacia la laguna facultativa 1.

Para realizar el balance se calculó la infiltración diaria en m^3/día, análogamente al razonamiento para paso mensual. Luego, el lixiviado diario se calculó suponiendo que, si en el día no hay infiltración el caudal de lixiviado es el base diario:

$$Q_{base\ ,diario} = Q_{base\ ,Febrero\ \ 2017}/29$$

Por otro lado, si existe infiltración entonces se calcula el lixiviado a partir de la relación lixiviado/infiltración de dicho mes:

$$Q_{lixiviado\ \ ,Febrero\ \ 2017}/Infiltración_{Febrero\ \ 2017} = 0{,}8$$

Por lo tanto, el razonamiento es el siguiente para cada día i:

$$Si\ Infiltración_i = 0 \rightarrow Q_{lixiviado\ \ ,i} = Q_{base\ ,diario}$$

$$Si\ Infiltración_i > 0 \rightarrow Q_{lixiviado\ \ ,i} = 0{,}8 \cdot Infiltración_i$$

Se observó que la sumatoria del balance diario es similar con el balance mensual, como se puede observar en la siguiente tabla:

	Febrero 2017			
	Q lixiviado	Q vertido a facultativa 1	Q a anaerobia	Q almacenado
Balance mensual	5.775,4	1.475,4	2.500,0	1.800,0
Balance diario	5.448,3	1.467,2	2.206,4	1.774,7

Tabla 36.- Balance diario y mensual

A su vez se observa que si se diseña con el balance mensual se está del lado de la seguridad ya que sobreestima los valores con respecto al balance diario.

Selección de la bomba

Se prevé la instalación de dos bombas de iguales características, una en funcionamiento y otra de reserva. El equipo seleccionado será apto para líquidos de las características del lixiviado ya que este contiene elementos que podrían aceleran el desgaste de la bomba.

El equipo debe vencer el desnivel geométrico hasta la laguna anaerobia y las pérdidas de carga en la conducción, distribuidas y localizadas. El desnivel geométrico a vencer es de 2,62 m. Para el cálculo de las pérdidas de carga localizadas se tienen cuatro codos.

Dado que el caudal a ser bombeado es bajo de 0,51 l/s, el diámetro de la tubería se definió de 0,04m

Diámetro (m)	0,04
Velocidad (m/s)	0,4

Tabla 37.- Diámetro y velocidad tubería

La longitud equivalente de un codo radio medio de 90° para el diámetro seleccionado fue calculada a partir de los valores propuestos por Azevedo N. y Acosta A. (1975) para tubería de hierro fundido, luego, dicho valor fue corregido por un factor para obtener el valor correspondiente al material PVC.

$$L_{codo} = (0{,}9) \cdot \left(\frac{C}{100}\right)^{1{,}85} = 1{,}46\ m$$

Siendo C el coeficiente para la ecuación de Hazen-Williams correspondiente a materiales plásticos:$C = 130$

	Cantidad	Longitud equivalente
Codo	4	5,85

Tabla 38.- Longitud equivalente, codos

Para el cálculo de las pérdidas de carga distribuidas y localizas se utilizó la fórmula de Hazzen-Williams:

$$H_{loc\ y\ dist} = L_{eq} \cdot \left(10{,}643 \left(\frac{Q}{C}\right)^{1{,}85} \left(\frac{1}{D}\right)^{4{,}87}\right)$$

Se obtiene entonces:

Longitud equivalente total	23,87
Pérdida de carga unitaria	0,007
Pérdida de carga (m)	**0,16**

Tabla 39.- Pérdidas de carga

La carga total a vencer por la bomba se calcula como:

$$H = H_{geometrico} + H_{loc\ y\ dist} = 2{,}62 + 0{,}16 = 2{,}78$$

Por lo tanto las características de la bomba son las siguientes:

Características Bomba	
Carga (m)	2,78
Caudal (m^3/s)	1,84

Tabla 40.- Características bomba

Con estos datos se seleccionó una bomba DAB modelo NOVA 180

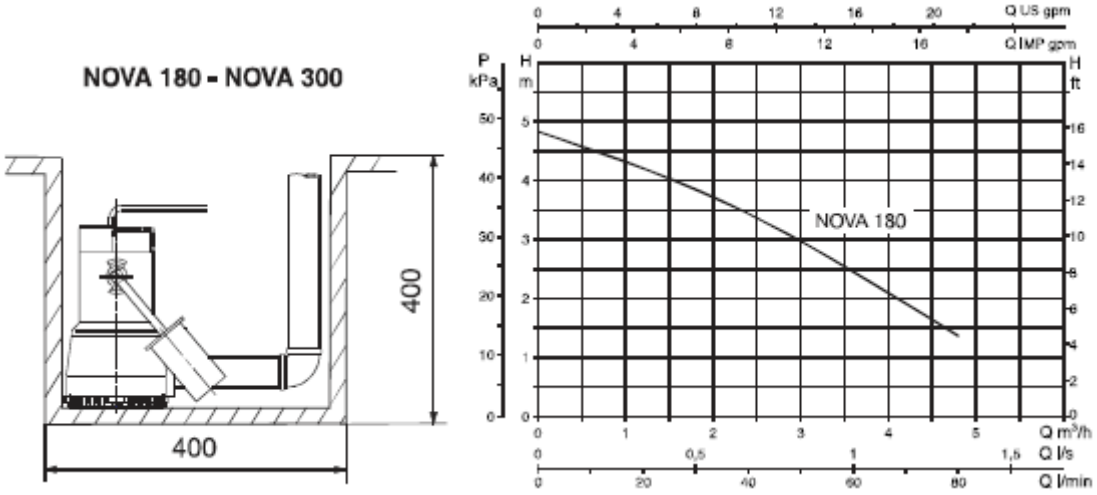


Figura 9.-Bomba DAB, modelo NOVA 180

6.2.3.2 Parámetros de diseño

En la Tabla 41 se presentan la permanencia dentro de la serie de datos de cada uno de los caudales de diseño durante el período de actividad del RSa (2016-2035).

	Caudal		Permanencia
	m^3/mes	m^3/día	Durante funcionamiento (2016-2035)
Mínimo	267,2	8,9	5%
Medio	502,9	16,8	38%
Máximo	1.173,6	39,1	41%
Bombeo	1.326,4	44,2	16%

Tabla 41.- Permanencia caudales de diseño

Visto que los caudales que presentan mayores permanencias son el medio y el máximo, se decidió adoptar las dimensiones de las lagunas diseñadas para tiempo seco verificar su funcionamiento para el caudal pico asociado a eventos de lluvia.

Luego, para definir las cargas de diseño, se analizaron varios eventos de lluvia que se dan en la serie de datos, que tienen asociados caudales de lixiviados mayores al máximo en tiempo seco y por lo tanto parte del mismo se desvía hacia la amortiguación para ser almacenado y bombeado controladamente hacia la laguna de amortiguación. En la Tabla 42, se presentan las características de dichos eventos.

Fecha	Total	Q lluvia	Q base	Concentración TS (mg DBO/L)	Carga (kgDBO/d)	Concentración diluida (mgDBO/L)
ago-16	1.489	1.230	258	5.000	43	868
sep-16	2.552	2.292	261	5.000	43	511
feb-17	5.775	5.444	331	5.000	55	287
jun-24	2.179	1.473	705	2.500	59	809
abr-26	3.607	3.332	275	5.000	46	381
may-26	2.002	1.725	276	5.000	46	690
jun-26	1.620	1.342	278	5.000	46	858
oct-26	2.575	2.287	287	5.000	48	558
jul-31	2.597	2.308	289	5.000	48	556
mar-35	2.606	1.306	1.300	800	35	399
abr-35	2.320	1.049	1.271	800	34	438

Tabla 42.- Eventos asociados al caudal pico

Como se puede observar las cargas varían en función de la etapa de operación, debido a esto se optó por seleccionar tres cargas para el diseño. La carga mínima, media y máxima fueron asociadas a los percentiles 10, 50 y 90 respectivamente (ver Tabla 43).

Percentil	Carga (kgDBO/d)
90	55,2
50	46,0
10	34,7

Tabla 43.- Cargas, Caudal pico

Por lo tanto, se verificará el funcionamiento del sistema de tratamiento para las situaciones correspondientes a tiempo de lluvia, que se presenta en la Tabla 44.

TIEMPO DE LLUVIA		
Caudal Pico (m^3/d)	**Concentraciones de diseño (mg/L)**	**Cargas de diseño (kg $DBO_{5,20}$/d)**
83,3	416,1	34,7
83,3	552,6	46,0
83,3	662,8	55,2

Tabla 44.- Parámetros de diseño, tiempo de lluvia

6.2.3.3 Laguna anaerobia

En este caso ya se tienen definidas las dimensiones de la laguna, las cuales fueron determinadas para tiempo seco. Por lo tanto, el tiempo de retención queda determinado a partir del caudal pico:

$$t_r = \frac{V_{laguna}}{Q_{pico}} = 4\ días$$

Luego se calculó la carga volumétrica para cada caso como:

$$L_v = L/V_{laguna}$$

Luego, se verificó que en todos los casos se encontrara dentro del rango admisible (0.1 – 0.3 kgDBO/m^3.d). Por último, razonando análogamente al tiempo seco se calcula la remoción de materia orgánica.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 45.

TIEMPO DE LLUVIA			
Laguna anaerobia			
Caudal de diseño	Mínimo	Medio	Máximo
Tiempo de retención (días)	4	4	4
Carga entrada: Lo[1] (kg DBO/d)	34,7	46,0	55,2
Carga volumétrica de aplicación: Lv (kg DBO/m^3.dia)	0,11	0,15	0,18
Remoción de DBO			
Concentración de entrada: DBOo[1](mg/L)	416	553	663
Concentración de salida: DBOe[1] (mg/L)	190	253	303
Eficiencia remoción	54%	54%	54%
Eficiencia corregida	54%	54%	54%
Concentración de salida corregida: DBOe (mg/L)	190	253	303
Carga de salida: Le[1] (kg DBO/d)	15,9	21,1	25,3

Tabla 45.- Laguna anaerobia, tiempo de lluvia

6.2.3.4 Laguna facultativa

Para ambas lagunas, el tiempo de retención se determinó como:

$$t_r = \frac{V_{laguna}}{Q_{pico}}$$

Luego se calculó la carga superficial para cada caso como:

$$L_s = L/A_{laguna} \ ,$$

Luego, se verificó que en todos los casos se encontrara dentro del rango admisible, siendo este entre 0.080 –0,120 kgDBO/m^2.d

Los resultados obtenidos para la primera y segunda laguna facultativa se presentan en la Tabla 46 y en la Tabla 47, respectivamente.

TIEMPO DE LLUVIA			
Laguna facultativa 1			
Caudal de diseño	Mínima	Media	Máxima
Tiempo de retención (días)	31	31	31
Carga entrada: Lo^1 (kg DBO/d)	15,9	21,1	25,3
Carga superficial de aplicación: Ls (kg DBO/m^2.dia)	0,0094	0,0124	0,0149
Remoción de DBO			
Concentración de entrada: $DBOo^2$ (mg/L)	190	253	303
Constante cinética a 20 °C: K	0,11	0,12	0,12
Constante cinética a temperatura t: K_t	0,09	0,10	0,10
d	0,5	0,5	0,5
a	2,5	2,6	2,6
Concentración de salida: $DBOe^2$ (mg/L)	1,2	5,9	17,7
Eficiencia remoción	84%	85%	86%
Eficiencia corregida	80%	80%	80%
Concentración de salida corregida: DBOe(mg/L)	38	51	61
Carga de salida: Le^2 (kg DBO/d)	3,2	4,2	5,1

Tabla 46.- Laguna facultativa 1, tiempo de lluvia

TIEMPO DE LLUVIA			
Laguna facultativa 2			
Caudal de diseño	Mínimo	Medio	Máximo
Tiempo de retención (días)	7	7	7
Carga entrada: Lo^2 (kg DBO/d)	3,2	4,2	5,1
Carga superficial de aplicación: Ls (kg DBO/m^2.dia)	0,0081	0,0108	0,0129
Remoción de DBO			
Concentración de entrada: $DBOo^3$ (mg/L)	38	51	61
Constante cinética a 20 °C: K	0,11	0,11	0,12
Constante cinética a temperatura t: K_t	0,09	0,10	0,10
d	0,5	0,5	0,5
a	1,5	1,5	1,5
Concentración de salida: $DBOe^3$ (mg/L)	21,9	28,4	33,4
Eficiencia remoción	42%	44%	45%
Eficiencia corregida	42%	44%	45%
Concentración de salida corregida: DBOe(mg/L)	22	28	33
Carga de salida: Le^3 (kg DBO/d)	1,8	2,4	2,8

Tabla 47.- Laguna facultativa 2, tiempo de lluvia

6.3 Remoción de nitrógeno

Como fue detallado en la Sección 5.7.1.2.de la Memoria Justificativa, del total del sistema de tratamiento, conformado por las lagunas (anaerobia y facultativas) se logra remover parte del nitrógeno que ingresa al sistema con el lixiviado.

Si bien se cuentan con diversas ecuaciones matemáticas que nos permiten determinar la concentración de nitrógeno a la salida de una laguna facultativa, dichas ecuaciones son deducidas a partir de experiencias con efluentes domésticos, y no aplicarían al efluente en cuestión.

Debido a esto, para determinar la concentración de nitrógeno a la salida del sistema, se emplearon las eficiencias en remoción obtenidas de la serie de datos del RSa Las Rosas. En la Tabla 48 se presentan los resultados obtenidos.

Remoción total del sistema en nitrógeno			
Concentración de entrada (mg Ntotal/L)	1899	654	231
Eficiencia total del sistema (%)	80%	70%	60%
Concentración de salida (mg Ntotal/L)	379,8	196,2	92,4

Tabla 48.- Resultados en remoción de nitrógeno en el total del sistema

Para continuar disminuyendo la concentración de nitrógeno en el efluente previo a su vertido, se prevé la construcción de un humedal de flujo vertical. En la Sección 5.7.1 de la Memoria Descriptiva, se detallan las características del humedal.

6.3.1 Diseño del humedal de flujo vertical

El humedal fue diseñado con geometría rectangular, de relación largo/ancho = 2 y 60 cm de profundidad.
El principal objetivo de la construcción de un humedal es la remoción de nitrógeno previo al vertido del efluente al curso de agua. Por lo tanto, el parámetro de diseño empleado fue la carga de aplicación superficial de nitrógeno, como se explicó en la Sección 5.7.1.2de la Memoria Justificativa, en base a datos experimentales se pueden obtener eficiencias en remoción del orden de 85% en nitrógeno con una carga de aplicación superficial de 18,8 kg/ha.d.

La metodología adoptada para el diseño fue la siguiente:

1. Se fija la carga de aplicación superficial en 18,8 kg N/ha.d
2. Se determina el área necesaria para el humedal para los tres caudales de diseño, en función de la carga de nitrógeno a la salida de la segunda laguna facultativa
3. Se selecciona el área máxima obtenida de los tres casos
4. Se determina el volumen total del humedal, fijando la profundidad del mismo en 60 cm
5. Por último, se determina el largo y ancho del humedal, a partir de la relación largo/ancho = 2

Las dimensiones obtenidas se presentan en la Tabla 49.

Dimensiones	
Volumen (m^3)	1154
Área superficial (m^2)	1923
Relación Ancho/Largo	2
Ancho (m)	31
Largo (m)	62

Tabla 49.- Dimensiones del humedal

Luego, para determinar la remoción de nitrógeno se aplicó directamente la eficiencia en remoción presentada en la bibliografía igual a 85%. Para ello se obtuvieron los resultados de la Tabla 50.

TIEMPO SECO			
Humedal de flujo vertical			
Caudal de diseño	Mínimo	Medio	Máximo
Tiempo de retención (días)	129,6	68,8	29,5
Carga entrada (kg N/d)	3,4	3,3	3,6
Carga superficial de aplicación (kg N/ha.dia)	18,8	18,8	18,8
Remoción de DBO			
Concentración de entrada (mg N/L)	379,8	196,2	92,4
Eficiencia remoción	85%	85%	85%
Concentración de salida(mg N/L)	57,0	29,4	13,9

Tabla 50.- Humedal, tiempo seco

Como fue mencionado en la Sección 5.7.1.2. de la Memoria Justificativa, se asumió que la concentración límite de nitrógeno permitida para vertido directo a curso de agua es de 30 mgN/L. Como se puede observar de la Tabla 50, el caso en que no se cumple con dicho límite es el del caudal mínimo de diseño, el cual ocurre aproximadamente el 5% del tiempo, con lo cual se decide que el tratamiento es adecuado, pero se deben prever controles rigurosos a la salida la planta de tratamiento para hacer seguimiento del efluente previo al vertido.

6.4 Conducciones entre lagunas

6.4.1 Modelación en el SWMM

Con el fin de analizar la respuesta de las lagunas frente a un evento de lluvia de 10 años de período de retorno, de duración 6 horas y con el pico a las 3 horas, se utilizó el programo EPA SWMM.

A su vez, para la modelación se consideró el escenario más crítico con el fin de dimensionar las conducciones de manera que funcionen siempre a superficie libre con tirante no mayor a 85 %. Para el escenario modelado, se consideró la entrada de máximo caudal de lixiviado a la laguna facultativa, correspondiente a 0,001 m^3/s, a su vez, se tuvo en cuenta el efecto de la lluvia que cae directamente sobre las lagunas.

Los diámetros de las conducciones entre lagunas y pendientes seleccionadas fueron los siguientes:

Tubería	Desde – Hasta	Diámetro	Largo	Pendiente (%)
1	Cámara previa – Anaerobia	0,11	7,7	0,5
2	Anaerobia – Facultativa 1	0,16	11,9	1,0
3	Facultativa 1–Facultativa 2	0,20	13,5	0,7
4	Facultativa 2–Humedal	0,20	14,0	0,7

Tabla 51.- Características, conducciones entre lagunas

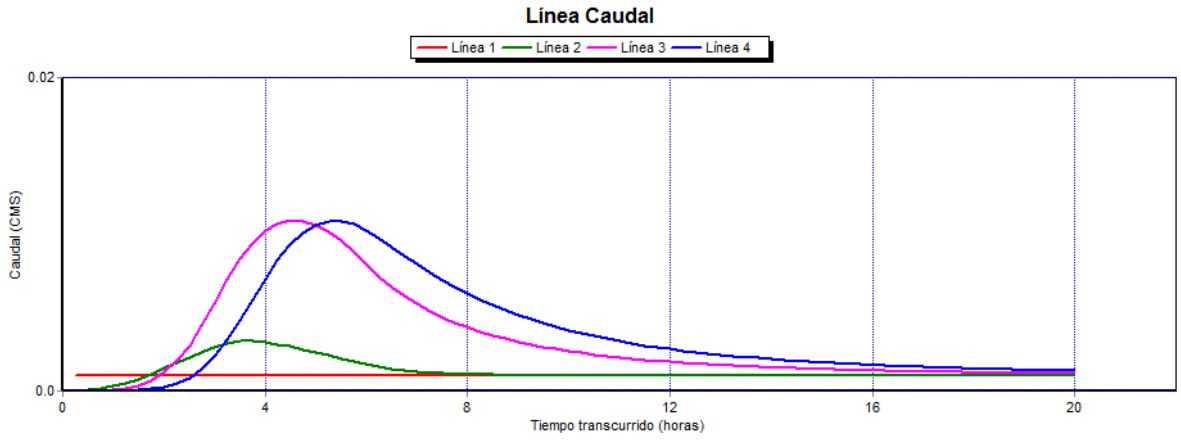


Tabla 52.- Hidrogramas de salida, modelados en SWMM

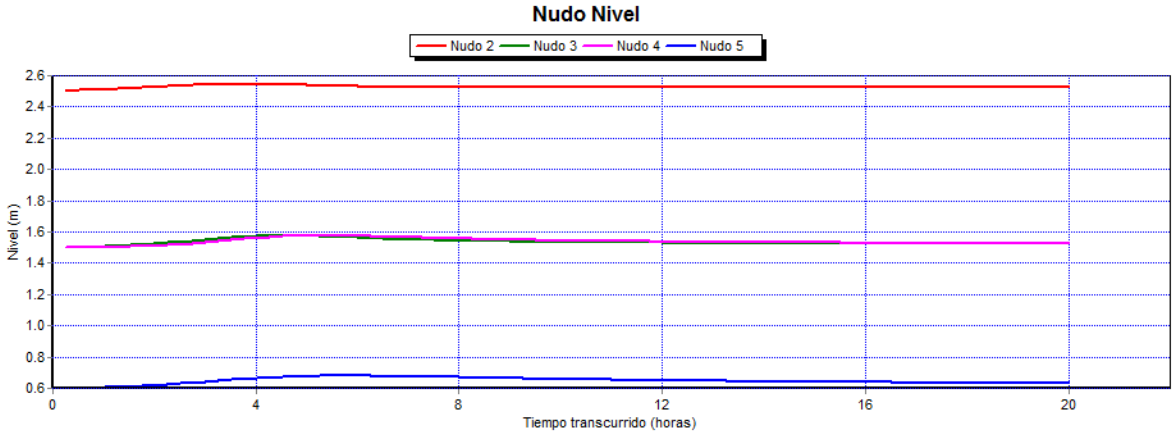


Tabla 53.- Variación de niveles en las lagunas, modelados en SWMM

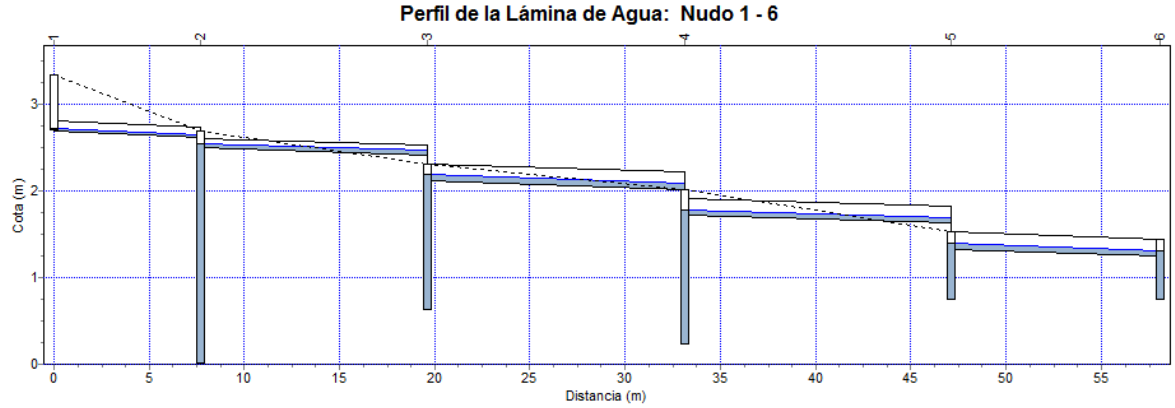


Tabla 54.- Perfil

7 Descarga de la planta de tratamiento

7.1 Emisario

La descarga de la planta de tratamiento se realiza a través de un emisario que conduce el efluente hasta el Arroyo Las Maulas, donde es vertido en condiciones aceptables según el Decreto 253/79.

El emisario se diseñó con una pendiente mínima de 0,4 %, de manera que el régimen de funcionamiento sea supercrítico y por lo tanto gobernado desde aguas arriba. A su vez, para sistemas de efluentes decantados se recomienda una pendiente de 0,33 % (Macintyre, 1992) por lo tanto, con el criterio adoptado se estará del lado de la seguridad.

El emisario fue modelado en el programa EPA SWMM, ingresando el hidrogma de salida del sistema de tratamiento. A continuación se presenta el perfil del emisario, las cotas representadas en el gráfico se encuentran medidas desde la base de la laguna anaerobia ya que de esa manera fueron ingresadas para la modelación:

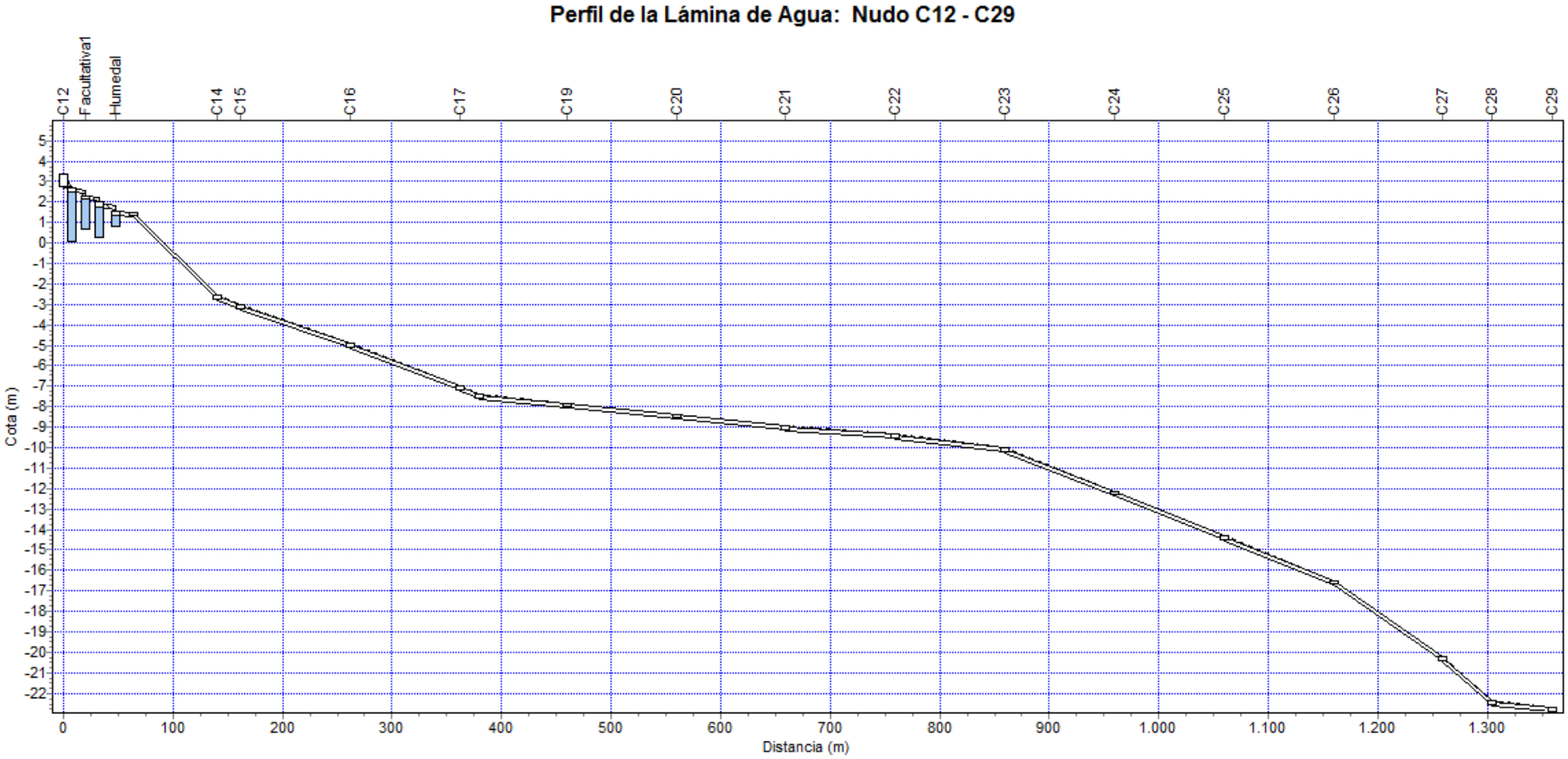


Gráfico 6.- Perfil emisario

La simulación se realizó para 20 horas, en las condiciones analizadas en ningún momento los tramos del emisario trabajaron a sección llena, dándose la situación más crítica a las 8 horas de la simulación donde la capacidad máxima que se presenta es de 0,44.

8 Conducción de pluviales

8.1 Diseño de las cunetas

Para determinar las cunetas para la conducción de las pluviales, se supuso la condición de funcionamiento del relleno más crítica, es decir cuando todos los módulos se encuentran clausurados.

El área de aporte de cada módulo fue divida equitativamente en 4 subcuencas, y luego se definió hacia donde se conduciría el agua que escurre por cada subcuenca. En la Figura 10 se puede observar el esquema de conducciones supuesto y en la Tabla 55 las características de las subcuencas y los tramos de aporte.

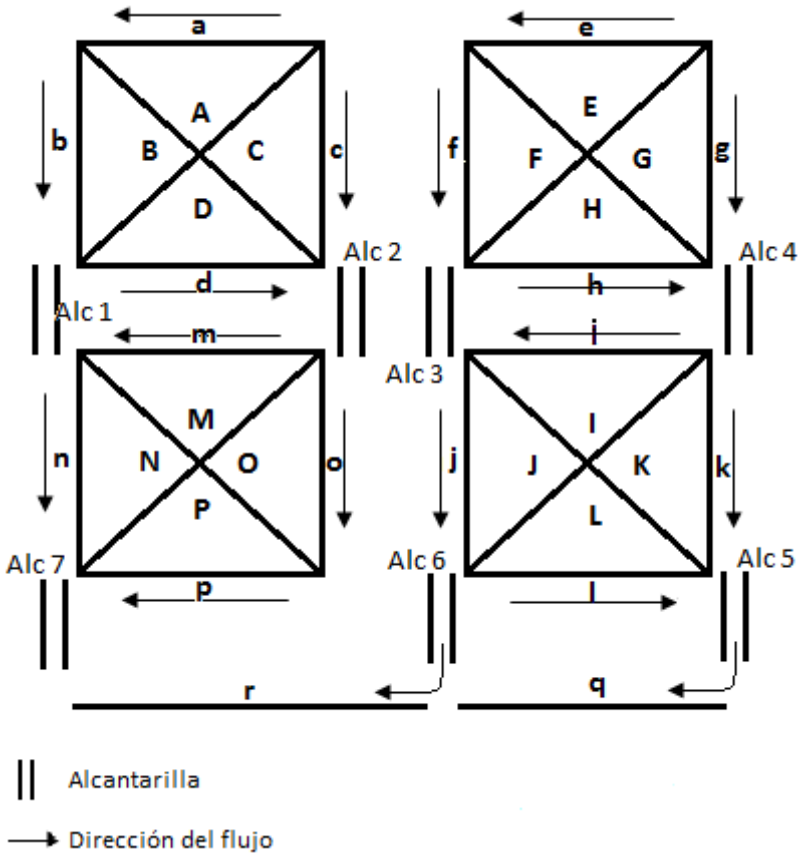


Figura 10.- Esquema de conducción de las pluviales

Modulo	Sub-cuenca	Área aporte (m^2)	Tramo	Longitud (m)
4	A	6876	a	155
	B	6876	b	155
	C	6876	c	155
	D	6876	d	155
2	E	6452	e	152
	F	6452	f	152
	G	6452	g	152
	H	6452	h	152
1	I	6260	i	150
	J	6260	j	150
	K	6260	k	150
	L	6260	l	150
3	M	6663	m	155
	N	6663	n	155
	O	6663	o	155
	P	6663	p	155

Tabla 55.- Características de las subcuencas y los tramos de aporte

Para determinar la geometría de las cunetas se aplicaron los siguientes criterios hidrológicos

- Tormenta de diseño de 5 años de periodo de retorno
- Estimación de los hidrogramas de escorrentía mediante el Método Racional
- Coeficiente de escorrentía = 0,75
- Tiempo de concentración inicial al comenzar a transitar por una cuneta de 5 minutos
- Precipitación para la zona de Mercedes según el mapa de isoyetas: $P_{3,10}$ = 86 mm

Para el diseño de las conducciones se tomaron las siguientes consideraciones:

- Capacidad de conducción medida como Tirante/Profundidad total menor al 80%
- Cuentas trapezoidales empastadas, de rugosidad de Manning = 0,03
- Taludes 1V:2H
- Ancho de base = 0,3 m
- Máxima velocidad admisible de 1,2 m/s
- Tensión tractiva en todos los tramos menos a 38 Pa.

El cálculo fue realizado acumulando las áreas de aporte (en los casos que corresponde) y tomando el tiempo de concentración al final del tramo como el tiempo de concentración al inicio del tramo más el tiempo de viaje por el mismo.

El tiempo de viaje por la cuneta se determina en una doble iteración junto con el caudal por la misma. Es decir que el proceso llevado a cabo es:

1. Determinar el caudal por la cuneta aplicando el Método Racional (ingresando el área de aporte correspondiente a cada tramo, cuidando de acumularla cuando corresponde)
2. Suponer un tiempo de viaje por la cuneta
3. Ingresar las características de la cuneta (N° de Manning, pendiente, longitud, ancho de la base y taludes)
4. Hallar el tirante dentro de la cuneta, iterando para que el valor del caudal coincida con el determinado en el Paso 1.
5. Re hallar el tirante dentro de la cuneta, iterando con el tiempo de viaje supuesto inicialmente (Paso 2) y el determinado a partir del caudal y la geometría de la cuneta.
6. Repetir pasos 4 y 5 hasta converger a un único valor de tirante.

Los resultados obtenidos para cada tramo se presentan en la Tabla 56.

Tramo	Subcuencasde aporte	Área aporte (m^2)	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Q (m^3/s)	tc AA (min)	t viaje (min)	tcaa (min)	tirante (m)	velocidad (m/s)	Tau (N/m^2)
a	A	6876	155	0,005	0,186	5	3,7	8,7	0,30	0,7	8,1
b	A+B	13752	155	0,005	0,315	8,7	3,2	11,9	0,37	0,8	9,9
c	C	6876	155	0,005	0,186	5	3,7	8,7	0,30	0,7	8,1
d	D	6876	155	0,005	0,186	5	3,7	8,7	0,30	0,7	8,1
e	E	6452	152	0,005	0,174	5	3,7	8,7	0,29	7,9	7,9
f	F+E	12904	152	0,005	0,295	8,7	3,2	11,9	0,36	0,8	9,7
g	G	6452	152	0,005	0,174	5	3,7	8,7	0,29	0,7	7,9
h	H	6452	152	0,005	0,174	5	3,7	8,7	0,29	0,7	7,9
i	I	6260	155	0,005	0,170	5	3,6	8,6	0,28	0,7	7,9
j	J+I+E+F	25424	150	0,005	0,521	11,9	2,7	14,7	0,46	0,9	12,0
k	K+H+G	19164	150	0,005	0,445	8,7	2,9	11,6	0,43	0,9	11,3
l	L	6260	150	0,005	0,170	5,0	3,6	8,6	0,29	0,7	7,9
Q	L+K+H+G	25424	150	0,005	0,528	11,6	2,7	14,3	0,47	0,9	12,1
r	J+I+E+F	25424	165	0,005	0,470	14,7	3,1	17,8	0,45	0,9	11,6
m	M	6663	155	0,005	0,180	5,0	3,7	8,7	0,29	0,7	8,0
n	N+M+A+B	27078	155	0,005	0,555	11,9	2,8	14,7	0,48	0,9	12,3
o	O+C+D	20415	155	0,005	0,475	8,7	2,9	11,6	0,45	0,9	11,6
p	P+C+D+O	27078	155	0,005	0,562	11,6	2,8	14,4	0,48	0,9	12,4

Tabla 56.- Resultados para cada tramo de aporte

Las alcantarillas del sistema fueron diseñadas utilizando el programa Hy-8, los resultados obtenidos se presentan en la Sección 7.2. de la Memoria Descriptiva.

9 Bibliografía

[1] Compromiso Empresarial para el Reciclaje (CEMPRE) – "Residuos Sólidos Urbanos - Manual de GestiónIntegral"– 1998

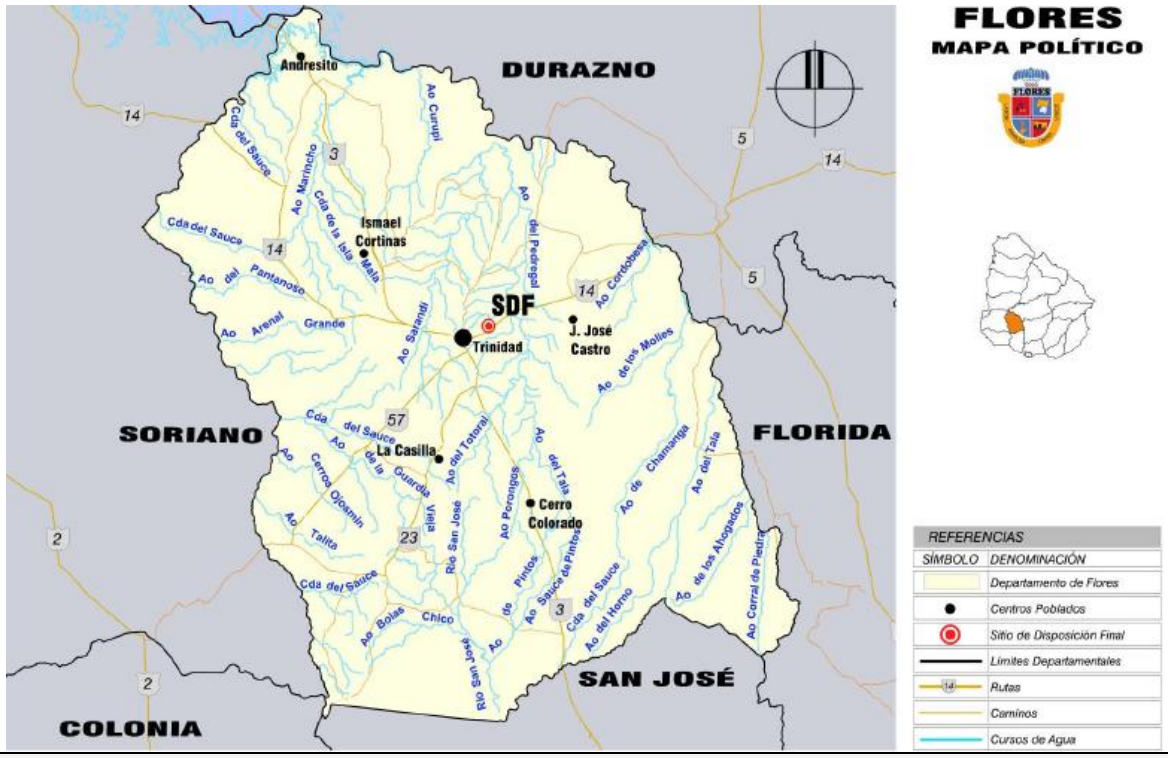
[2] George Tchobanoglous – "Gestión Integral de Residuos Sólidos" –1992

[3] "Manual para la operación de rellenos sanitarios" – SEDESOL – 2006

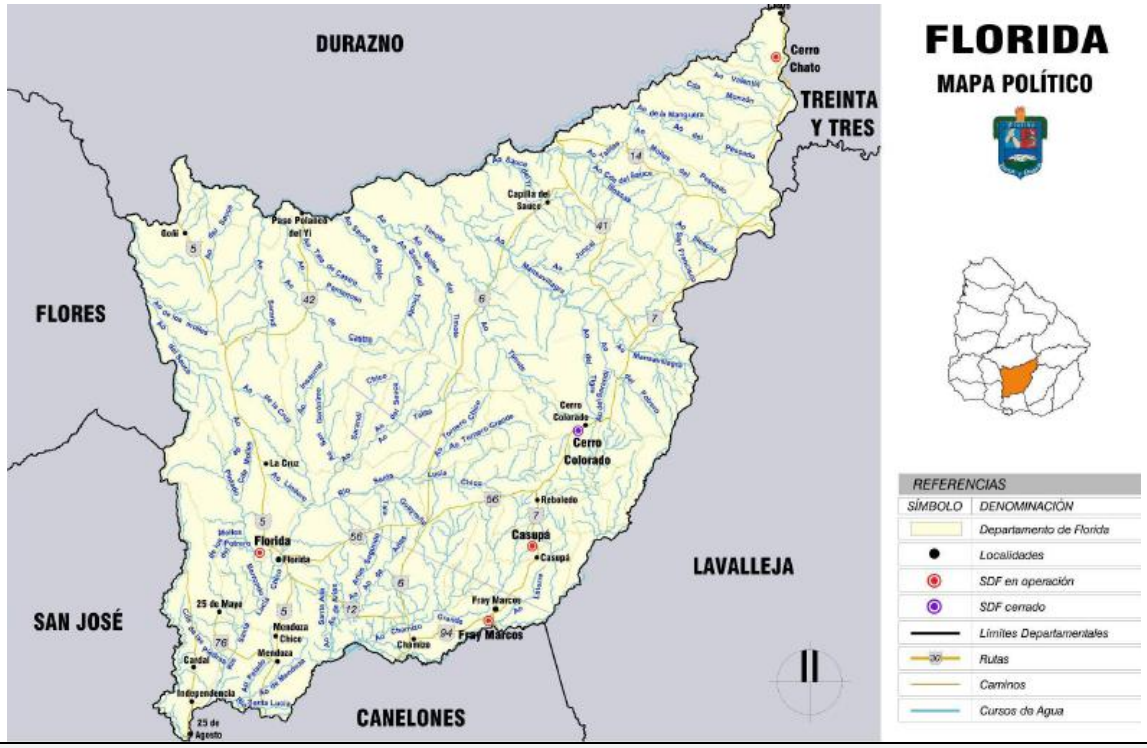
[4] "Propuesta Técnica para la Reglamentación – Gestión Integral de residuos sólidos industriales y agroindustriales y de servicios" – Documento versión 16/06/03

Fichas Resumen Situación en el Interior del País

A continuación se presenta una ficha resumen para cada departamento del país, detallando los sitios de disposición final con población servida mayor a 5.000 habitantes, la recolección y clasificación (en caso de existir) llevada a cabo en cada uno de los SDF presentados.

Flores		
Descripción	El departamento de Flores se sitúa en el centro – suroeste del país y abarca una superficie de 5.144 km^2. Las principales vías de acceso son la Ruta Nacional 3, 14, 57 y 23. 	
Población	***Localidad***	***Nº de habitantes***
	Trinidad (capital)	20.982
Sitios de Disposición final	Trinidad	- Población Servida: 22.394 habitantes - Disposición: 20 ton/día - Tipo de operativa: manejo de varios frentes de trabajo y cobertura parcial de resiudos. - Tipo de residuos: RSD, públicos y comerciales
Recolección	Trinidad	- Recolección de RSU: mediante levante manual de bolsas en el horario nocturno, con una frecuencia de seis veces por semana. Cuentan con 3 camiones con caja compactadora. - Recolección selectiva: posee circuitos limpios de recolección selectiva en algunos barrios de Trinidad y la totalidad de Ismael Cortinas. - La recolección selectiva es realizada puerta a puerta cuatro veces a la semana, por un grupo organizado de clasificadores llamado “El Progreso”

Clasificación	Trinidad	- La clasificación la realiza el grupo “El Progreso”, conformado por 26 personas, cuentan con una planta de clasificación. - Se clasifican residuos de PET, PEAD, chatarra ferrosa, vidrio y otros - En la planta operada por el grupo “El Progreso”, además de la clasificación, se realiza el reciclaje de plástico. Se realiza el lavado y aglomerado del PEAD flexible, luego se extrusa y pelletiza. El material rígido se muele y luego se extrusa y pelletiza.

Florida	
Descripción	El departamento de Florida se sitúa en el centro sur del país y abarca una superficie de 10.417 km^2. Las principales vías de acceso son la Ruta Nacional 5 y 7. 

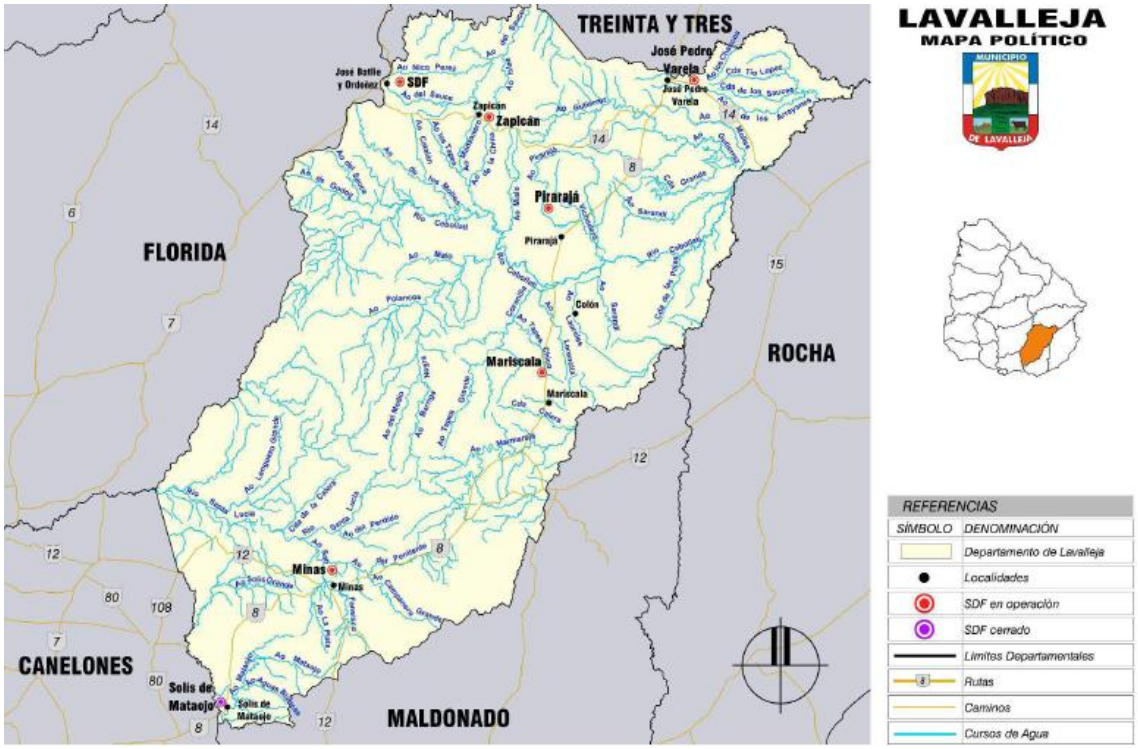
Población	*Localidad*	*Nº de habitantes*
	Florida (capital)	32.128
	Sarandí Grande	6.362

Sitios de Disposición final	Florida	- Población Servida: 44.344 habitantes - Disposición: 40 ton/día - Localidades que aportan: Florida, Sarandí Grande, 25 de agosto, Cardal, 25 de mayo, Berrondo, Mendoza - Tipo de operativa: Encapsulado de la fracción no valorizable de los residuos. Dichas cápsulas se componen de materiales plásticos resistentes a la acción mecánica y rayos UV. Las mismas se disponen en el terreno enterradas, en un área acondicionada a tal fin. Se estima la conformación de 10 cápsulas diarias, que son enterradas al final de cada semana. - La cápsula impermeable impide la entrada de agua de lluvia, lo que evita la formación de lixiviados.
Recolección	Florida	- Recolección de RSU: la recolección se realiza diariamente.
Clasificación	Florida	- Cuenta con una planta de clasificación de residuos sólidos urbanos en donde se separa y acondiciona la fracción valorizable.

Lavalleja

Descripción

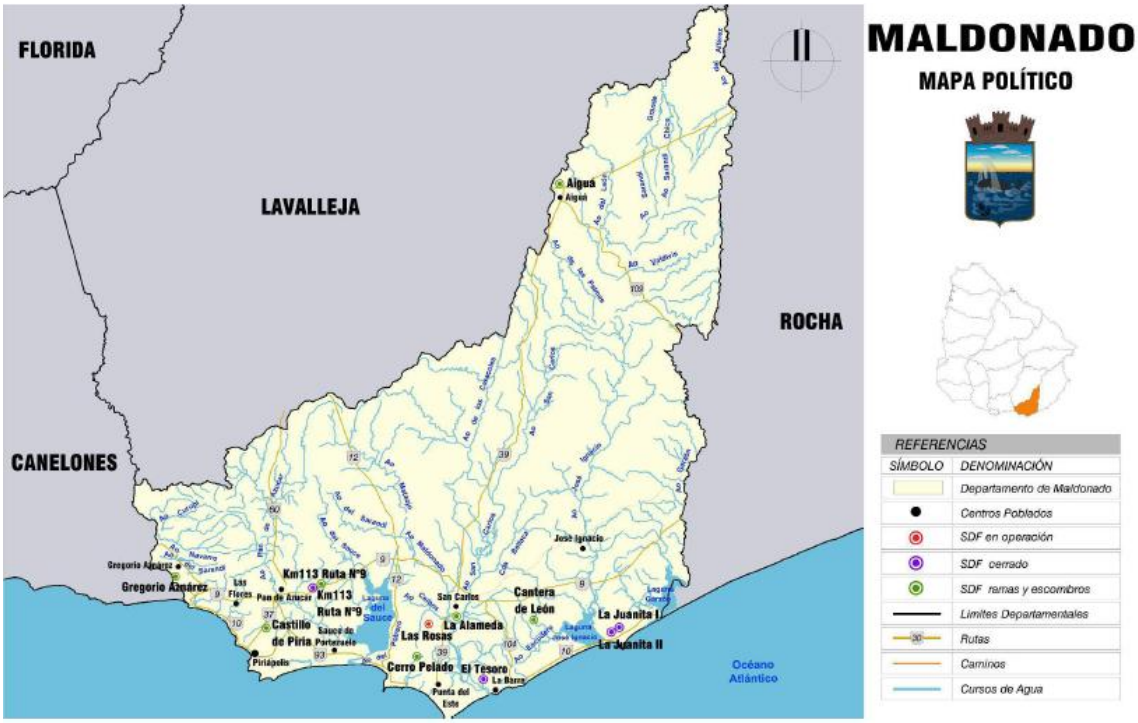
El Departamento de Lavalleja se sitúa al sureste del país y abarca una superficie de 10.016 km². Las principales rutas de acceso a Lavalleja son la Ruta 8, 12 y 60.



	Localidad	*Nº de habitantes*
Población	Minas (capital)	37.925
	José Pedro Varela	5.332

Sitios de Disposición final	Minas	- Población Servida: 41.000 habitantes - Disposición: 32,3 ton/día - Localidades que aportan: Minas, Villa del Rosario, Villa Serrana, Penitente y Solís de Mataojo - Tipo de operativa: Vertedero a cielo abierto.. - Tipo de residuos: RSD, públicos y comerciales
	José Pedro Varela	- Población Servida: 5.500 habitantes - Disposición: 4,3 ton/día - Tipo de operativa: Vertedero a cielo abierto - Tipo de residuos: RSU y residuos agro industriales.
Recolección	Minas	- Recolección de RSU: se realiza mediante dos modalidades: en la zona céntrica se utilizan contenedores y en el resto mediante el método tradicional de levante manual - Recolección selectiva: no se realiza recolección selectiva.

Maldonado	
Descripción	Maldonado se ubica al sur – sureste del territorio uruguayo. Ocupa una superficie de 4,793 km^2. Las principales vías de acceso son la ruta Interbalnearia y la Ruta 9.



Población	***Localidad***	***Nº de habitantes***
	Maldonado (capital)	54.603
	San Carlos	27.771
	Pinares- Las Delicias	8.524
	Piriápolis	7.899
	Punta del Este	7.298
	Pan de Azúcar	7.098
	Cerro Pelado	6.385

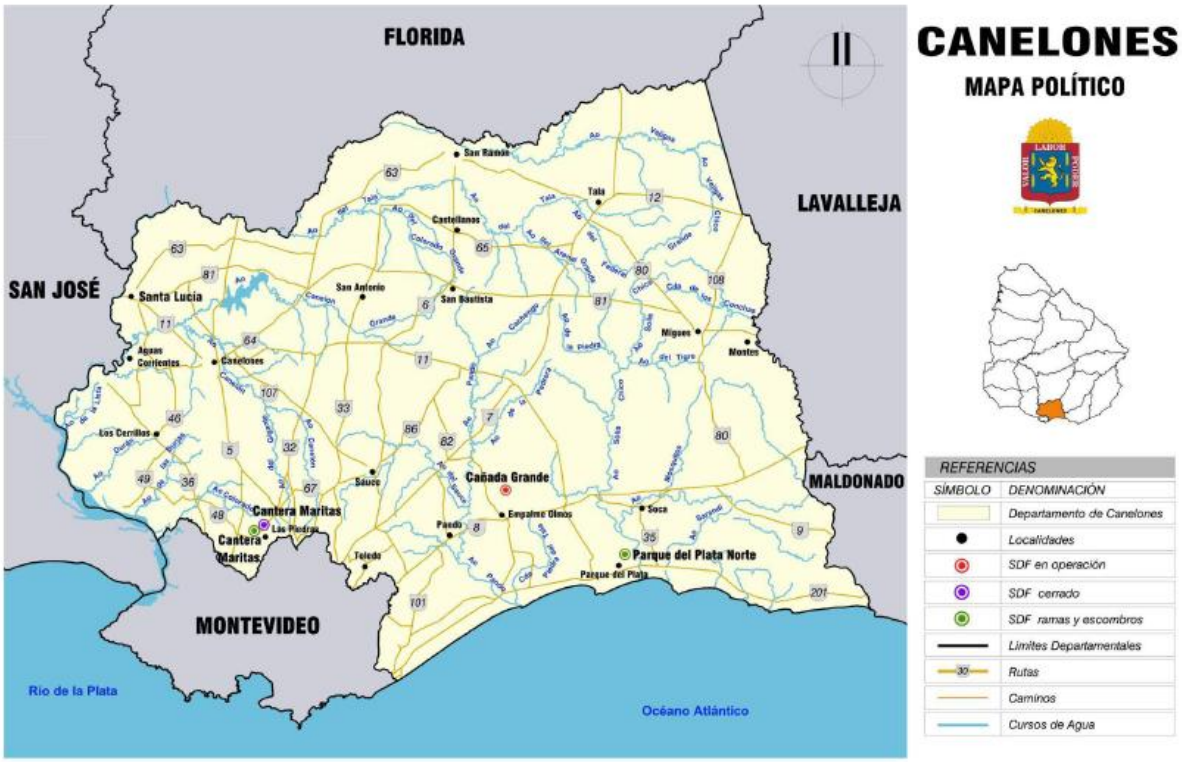
Sitios de Disposición final		
	Las Rosas	- Población Servida: 130.918 habitantes (la población se incrementa al doble en temporada estival) - Disposición: 150 ton/día (la disposición se incrementa al doble en temporada estival) - Localidades que aportan: La totalidad de las áreas urbanas del departamento, cercanas al RSa. - Tipo de operativa: relleno sanitario. - Tipo de residuos: RSD.

	Cerro Pelado	- Población Servida: 82.400 habitantes - Disposición: 150 ton/día - Localidades que aportan: Maldonado - Punta del Este incluyendo zona costera desde Arroyo Maldonado a Arroyo El Potrero - Tipo de operativa: vertedero controlado - Tipo de residuos: Podas, obras civiles, chatarras, neumáticos.
	La Alameda	- Población Servida: 24.800 habitantes - Disposición: 25 ton/día - Localidades que aportan: Piriápolis y zona costera desde Arroyo Tarariras a Arroyo El Potrero. - Tipo de operativa: vertedero controlado - Tipos de residuos: Podas, obras civiles, chatarras.
	R Nº 37 km 5	- Población Servida: 18.700 habitantes - Disposición: 15 ton/día - Localidades que aportan: Pirápolis y zona costera desde Arroyo Tarariras a Arroyo El Potrero.
Recolección	Maldonado	- Recolección de RSU: en la capital y en la zona costera se realiza mediante un servicio de recolección tercerizado a cargo de la empresa ECOTECNO. El servicio globalmente se brinda con una frecuencia de 3 días por semana, en las ciudades de Maldonado y Punta del Este la frecuencia es de 6 días a la semana, aumentándose a diaria en alta temporada. - Recolección selectiva: se ha implementado un servicio de recolección de RAEE (Registro de Aparatos Eléctricos y Electrónicos) y neumáticos realizado por la empresa ECOTECNO. También se implementan los circuitos limpios puerta a puerta y se está en etapa de implementación de la incorporación de centros de entrega voluntaria.
Clasificación	Maldonado	- Los principales materiales que se recolectan, clasifican y valorizan son el papel, cartón, envases de PET y de plástico flexible (PEAD) - La clasificación es realizada por circuitos limpios puerta a puerta y los que realizan los circuitos limpios de grandes generados son quienes posteriormente clasifican los residuos en el SDF de Cerro Pelado. - Existen aprox. 50 clasificadores informales que trabajan en las calles, y 10 clasificadores en los diferentes SDF de ramas, escombros y chatarras. En el RSa de Las Rosas no hay clasificadores.

Canelones

Descripción

El departamento de Canelones ocupa parte del centro sur del país. La superficie total es de 4.536 km^2, siendo la población total del departamento de 485.240 habitantes.
Dada la cercanía con la capital, la comunicación con esta y varios departamentos es basta y garantizada principalmente por las Rutas 5, 7, 8, 9, y la 11.



Población (localidades con más de 15.000 habitantes)

Localidad	*Nº de habitantes*
Las Piedras	69.222
Pando	24.004
La Paz	19.832
Canelones (capital)	19.631
El Pinar	17.221
Santa Lucía	16.475
Lomas de Solymar	16.018
Solymar	15.908
Progreso	15.775
Fracc. Con Maldonado	15.057
Paso Carrasco	15.028
Población Rural	55.128

Sitios de Disposición final

Cañada Grande

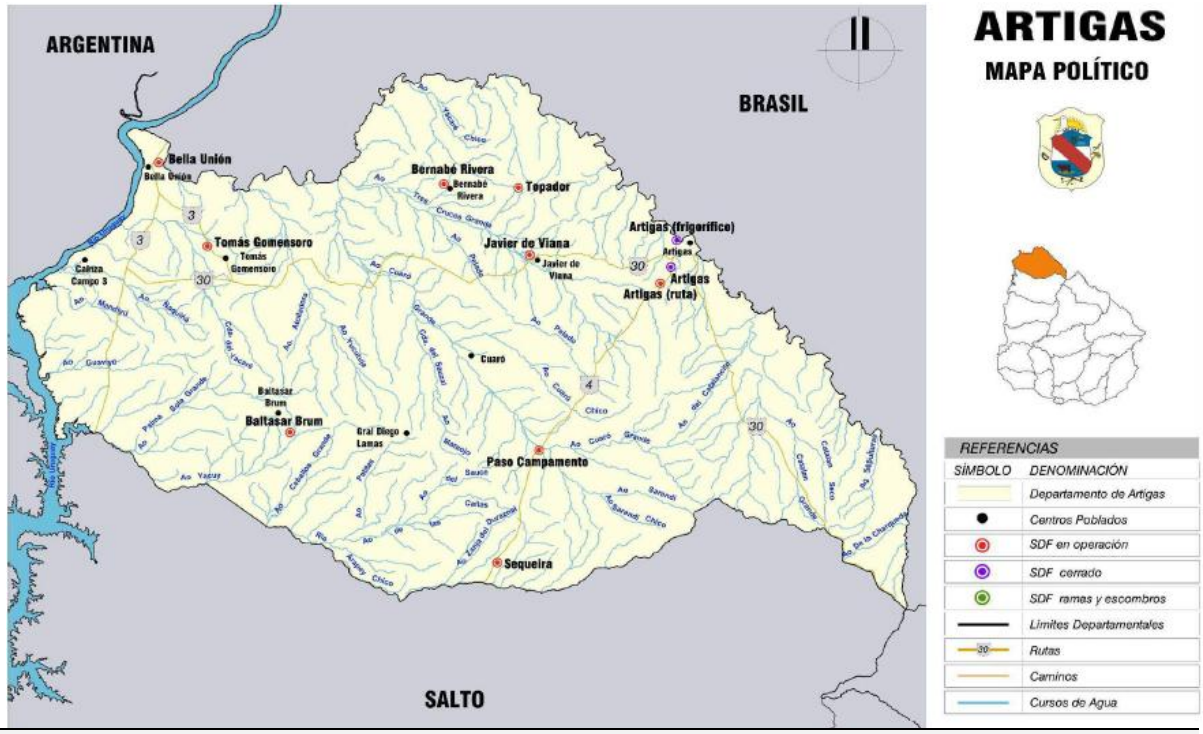
- Población Servida: 430.000 habitantes
- Disposición: 410 ton/día
- Tipo de operativa: se trabaja en forma continua, se realiza excavación para la extracción de material para cobertura y taludes.
- Tipo de residuos: RSD, públicos, comerciales, industriales y escombros.

Recolección	Cañada Grande	- Recolección de RSU: en las zonas con mayor densidad de habitantes se utiliza la recolección mediante contenedores y en zonas donde la densidad habitacional es menor, la recolección se realiza de forma manual. - Recolección selectiva: se cuenta con un servicio de recolección de Restos Vegetales, el cual varía en su frecuencia y manejo según la zona. - También está en aplicación el programa "Tu Envase Nos Sirve" en el marco de la Ley de Envases. El programa abarca todo el departamento y funciona con 4 grupos distribuidos por zonas, formalizando en total a 69 clasificadores

Artigas

Descripción

Se sitúa al noroeste del país y abarca una superficie de 11.928 km^2. Limita al norte y al noreste con Brasil, y al oeste con Argentina.
Las principales vías de acceso son la Ruta 3, la Ruta 30 y la Ruta 4.



Población

Localidad	*Nº de habitantes*
Artigas (capital)	41.687
Bella Unión	17.837

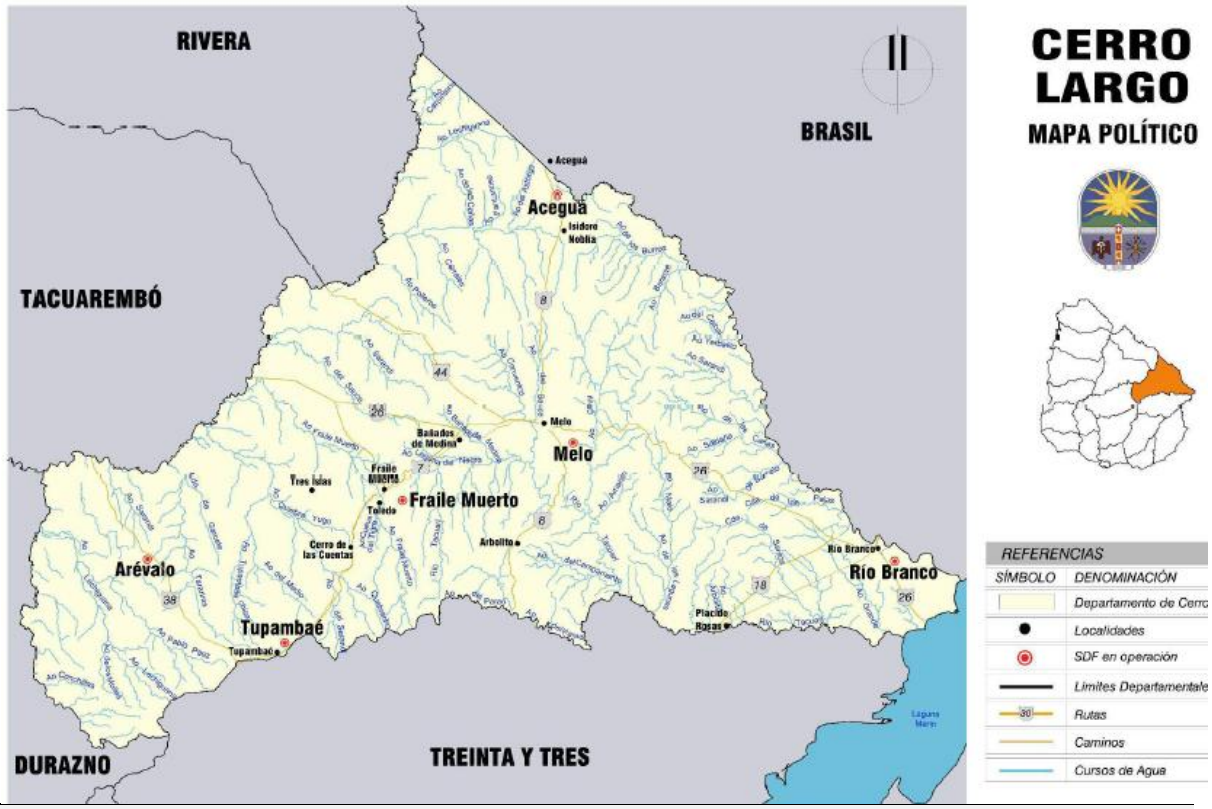
Sitios de Disposición final

Artigas	- Población Servida: 43.977 habitantes - Disposición: 40 ton/día - Operativa: se controla la descarga de residuos. Compactación durante 2 a 3 días y luego se cubre. - Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos, pilas, residuos hospitalarios.
Bella Unión	- Población servida: 19.274 habitantes - Disposición: 16 ton/día - Operativa: se controla la descarga de los residuos, se realiza la cobertura diaria. - Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos, industriales.

Recolección

Artigas	- Recolección de RSU: mediante levante manual de bolsas en horarios preestablecidos, cuenta con 8 camiones compactadores y dos camiones abiertos. - Recolección selectiva: es realizada puerta a puerta por un grupo de clasificadores y luego un camión de la IdA recoge el material recolectado y lo traslada al sitio de acopio y depósito que utilizan los clasificadores. Además la IdA se encuentra reacondicionando un galpón localizado en la localidad de Pintado, a 4 km del centro de Artigas, que será concedido al grupo de clasificadores para que lo utilicen como centro de acopio del material recolectado.

	Bella Unión	- Recolección de RSU: no se cuenta con una frecuencia establecida. se realiza durante seis días a la semana en horario nocturno. Además se encarga de la recolección de residuos de las localidades de Colonia Palma, Cainsa y Calpica, con una frecuencia de dos veces por semana. - Recolección selectiva: es realizada puerta a puerta por un grupo de clasificadores, recolectando principalmente envases de PET.

Cerro Largo	
Descripción	El departamento de Cerro Largo se sitúa al este del país. En su totalidad Cerro Largo abarca 13.648 km². Las principales rutas de acceso son la Ruta 8, Ruta 7 y la Ruta 26. 

Población	*Localidad*	*Nº de habitantes*
	Melo	50.578
	Río Branco	13.456

Sitios de Disposición final		
	Melo	- Población Servida: 50.578 habitantes - Disposición: 45 ton/día - Operativa: vertedero a cielo abierto. - Tipo de residuos: urbanos, asimilables a urbanos.
	Río Branco	- Población servida: 13.783 habitantes - Disposición: 8 ton/día - Operativa: vertedero a cielo abierto

Recolección		
	Melo	- Recolección de RSU: en el centro de la ciudad se realiza mediante un sistema de contenedores y en el resto la modalidad es de levante manual. El servicio se brinda con una frecuencia de dos días por semana. - Recolección selectiva: es realizada mediante circuitos limpios con puntos de entrega voluntaria.
	Río Branco	- Recolección de RSU: se realiza manualmente con un camión compactador y dos camiones abiertos, con una frecuencia de seis veces por semana en el centro y tres veces por semana en el resto de la ciudad.

Clasificación	Melo	-	Se recupera PET, cartón, nylon y chatarra
	Río Branco	-	Se realiza la recolección y acopio de neumáticos

Colonia

Descripción

El departamento de Colonia se sitúa en el suroeste del país y abarca una superficie de 6,106 km^2. Las principales vías de acceso son la Rutas 1, 2, 21 y 11.



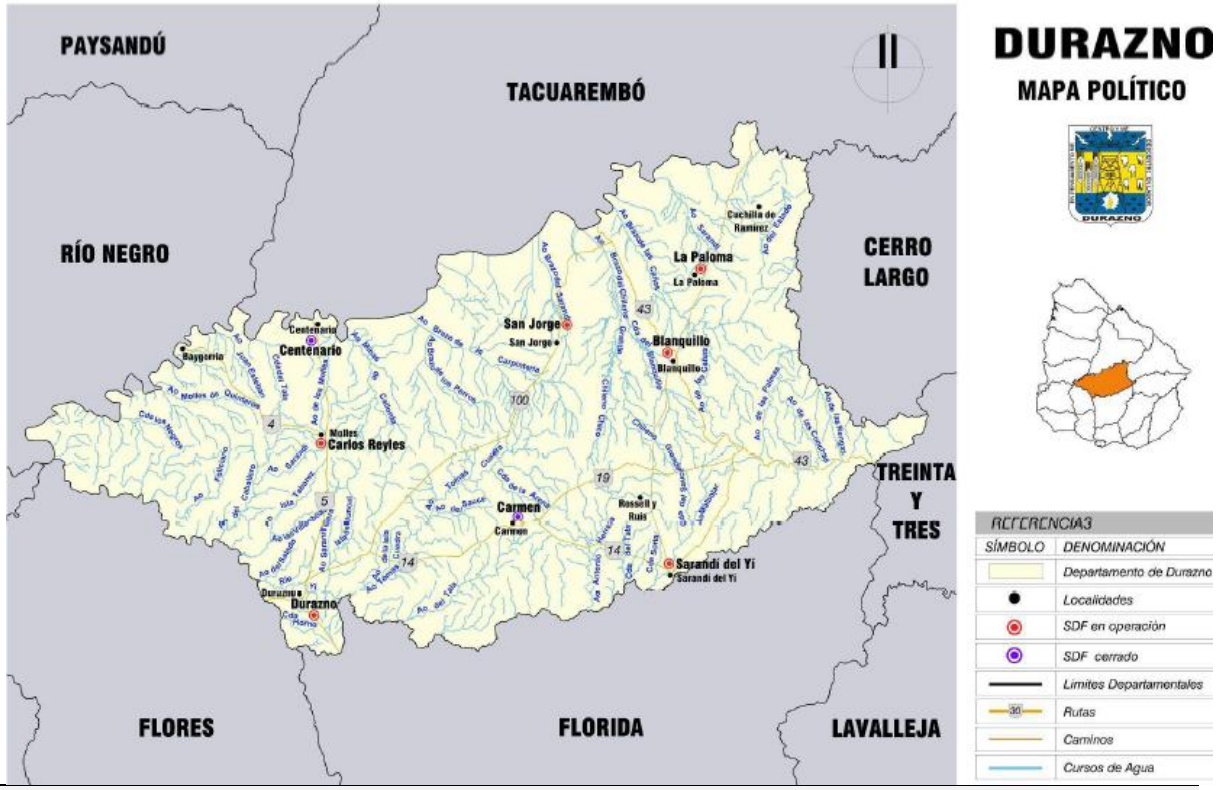
Población

Localidad	*Nº de habitantes*
Colonia del Sacramento (capital)	21.714
Carmelo	16.866
Juan Lacaze	13.196
Nueva Helvecia	10.002
Rosario	9.311
Nueva Palmira	9.230
Tarariras	6.070

Sitios de Disposición final

Reducto	- Población Servida: 27.784 habitantes - Disposición: 50 ton/día (según IdeCol). 30 ton/día (según informe de Colonia del Sacramento) - Operativa: vertedero a cielo abierto. La quema de residuos es común. - Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos, RAEE. - Localidades que aportan: Colonia del Sacramento y Tarariras
La Paz	- Población servida: 37.509 habitantes - Disposición: 41 ton/día - Operativa: vertedero controlado - Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos, residuos hospitalarios e industriales - Localidades que aportan: Juan Lacaze, Rosario, La Paz, Nueva Helvecia, Colonia Valdense, Cufré

	Polanco	- Población servida: 26.096 habitantes - Disposición: 37 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos, industriales - Localidades que aportan: Nueva Palmira, Carmelo
Recolección	Colonia del Sacramento	- Recolección de RSU: la recolección se realiza diariamente y en el centro de la ciudad dos veces al día. Cuenta cinco camiones recolectores. - Existe un servicio de recolección diferenciado para residuos voluminosos, con una frecuencia de dos veces a la semana. - Recolección selectiva: es realizada puerta a puerta por un grupo de clasificadores y luego un camión de la IdCol recoge el material recolectado y lo traslada al sitio de acopio y depósito.
	Carmelo	- Recolección selectiva: es realizada a través de circuitos limpios por una organización de clasificadores.
	Colonia Valdense, Nueva Helvecia, Rosario, Juan Lacaze	- Tienen un sistema de clasificación selectiva por iniciativa de la ONG Defensa de Medio Ambiente de Valdense (DEMAVAL). - Recolección selectiva de residuos orgánicos que son enviados a planta de compost, la recolección de los mismos se realiza dos veces por semana.

Durazno	
Descripción	El Departamento de Durazno se encuentra en el centro del territorio nacional ocupando una superficie total de 11.646 km^2. Las principales rutas de acceso son las Rutas 5 y 6 que atraviesan de sur a norte y la ruta 14 que conecta de este a oeste. 

	Localidad	*Nº de habitantes*
Población	Durazno (capital)	33.576
	Sarandí del Yí	7.289

Sitios de Disposición final	Durazno	- Población Servida: 35.570 habitantes - Disposición: 23 ton/día - Operativa: vertedero a cielo abierto. - Tipo de residuos: RSD e industriales - Localidades que aportan: Durazno, Santa Bernardina, Villa del Carmen
	Sarandí del Yí	- Población servida: 7.289 habitantes - Disposición: 4,5 ton/día - Operativa: vertedero controlado - Tipo de residuos: RSU
Recolección	Durazno	- Recolección de RSU: la recolección se realiza seis veces a la semana. En el centro de la ciudad se utiliza la modalidad con contenedores y en el resto la recolección es manual. Cuentan con cinco camiones compactadores - Recolección selectiva: No se tienen experiencias de recolección selectiva.

Treinta y Tres

Descripción

El departamento de Treinta y Tres se encuentra al este del país abarcando una superficie total de 9.529 km^2.
Las principales vías de comunicación del departamento con el resto del país son la Ruta 8 y la 18.



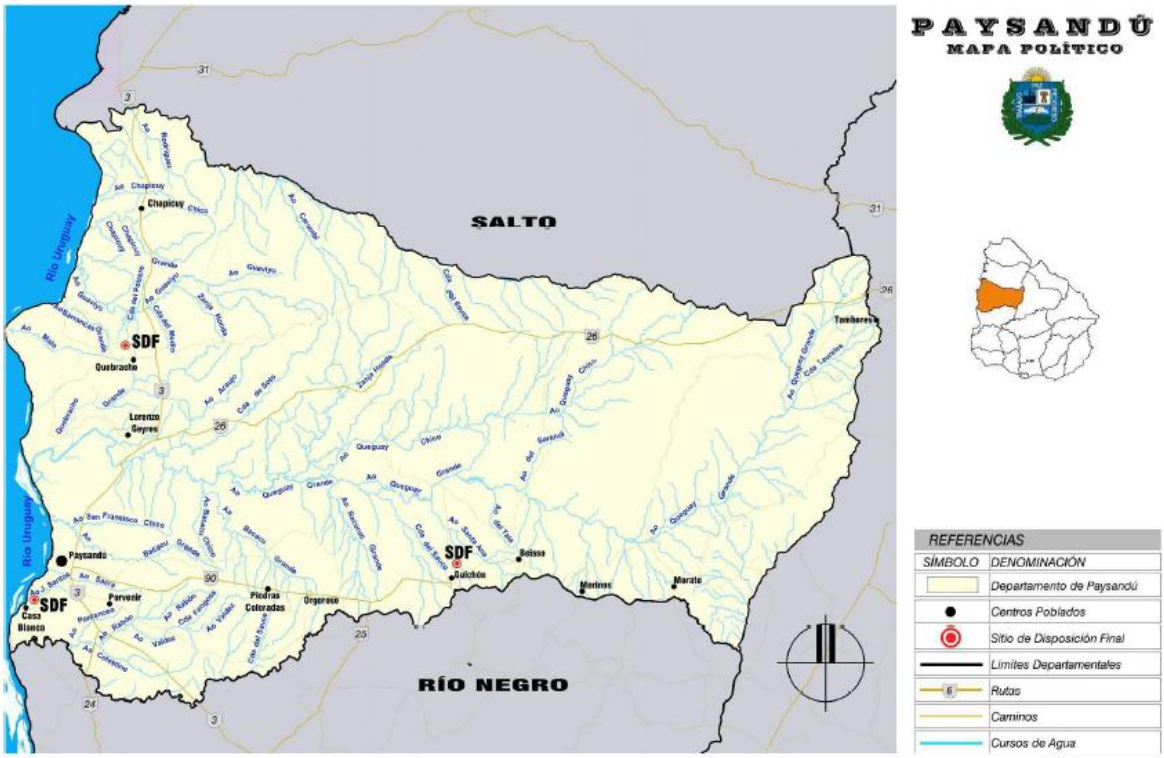
Población	***Localidad***	***Nº de habitantes***
	Treinta y Tres (capital)	32.956

Sitios de Disposición final	Treinta y Tres	- Población Servida: 32.956 habitantes - Disposición: 16,5 ton/día - Operativa: vertedero a cielo abierto. - Tipo de residuos: RSU y asimilables a urbanos - Localidades que aportan: Treinta y Tres, Ejido, Villa Sara, Mª Albina, El Oro.
Recolección	Treinta y Tres	- Recolección de RSU: la recolección se realiza mediante levante manual. Se cuenta con un proyecto para implementar la recolección mediante contenedores en la zona céntrica. - Recolección selectiva: Se realizan circuitos limpios a cargo de los grupos de clasificadores “Los Orejanos” y “Los Olimareños”

Paysandú

Descripción

Se sitúa al oeste del país y abarca una superficie de 13,922 km^2.
Las principales vías de acceso son la Ruta Nacional 3 y la Ruta Nacional 24.



Población

Localidad	*Nº de habitantes*
Paysandú (capital)	73.272
Guichón	5.025

Sitios de Disposición final

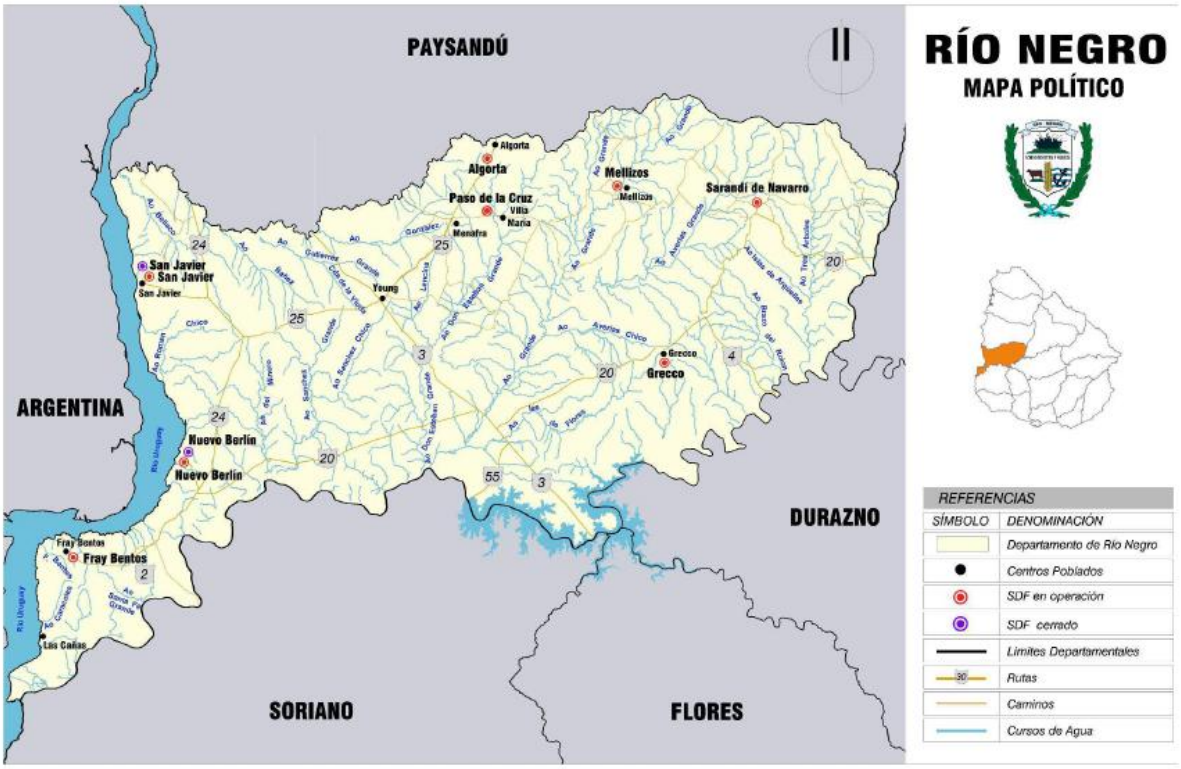
Paysandú	- Población Servida: 75.000 habitantes - Disposición: 60 ton/día - Operativa: se controla la ubicación de los residuos, cobertura cuando hay maquinaria disponible y colocación de algún drenaje de lixiviados y chimenea de gases - Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos, industriales
Guichón	- Población servida: 5.200 habitantes - Disposición: 4 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Operativa: se controla la ubicación de los residuos - Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos, RAEE
Quebracho	- Población servida: 4.500 habitantes - Disposición: 3,8 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Operativa: se controla la ubicación de los residuos y cobertura una vez por semana - Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos, agrícola, barométrica

Recolección	Paysandú	- Recolección de RSU: mediante levante manual de bolsas en horarios preestablecidos, contando con 8 camiones compactadores y dos camiones abiertos. - Recolección selectiva: se realiza puerta a puerta con carros tirados por caballos, bicicletas o a mano. Se recupera aprox. 2,200 kg/mes de materiales reciclables, dentro de estos: plástico, cartón, vidrio, papel ropa, electrodomésticos, etc. - Se estima que hay unos 150 clasificadores informales, que alcanzan a recolectar unas 200 t/mes.
	Guichón	- Recolección de RSU: se realiza durante seis días a la semana en horario nocturno. Además se encarga de la recolección de residuos de las localidades de Beisso, Merinos, Morató, Quetucura (1 vez por semana) y Termas de Almirón
	Quebracho	- Recolección de RSU: tres veces a la semana. Se dispone de un camión compactador.
Clasificación	Paysandú	- Según un registro del 2011 en la ciudad de Paysandú se recuperaban aprox. 1,800 kg/mes de materiales reciclables y existían 15 clasificadores que controlaban el ingreso de los residuos al SDF. Actualmente no se tienen datos, y se asume que no hay un control real sobre los clasificadores que entran al SDF.
	Guichón	- En Guichón no existe nadie realizando la tarea de clasificación.
	Quebracho	- En Quebracho hay entre cuatro y cinco clasificadores trabajando dentro del SDF de forma no organizada

Río Negro

Descripción

Se sitúa al oeste del país y abarca una superficie de 92.820 km^2.
Las principales vías de acceso son la Ruta Nacional 3, que cruza al departamento de sureste a noroeste y las Rutas 24, 25 y 20.



Población

Localidad	*Nº de habitantes*
Fray Bentos (capital)	23.122
Young	15.759

Sitios de Disposición final

Fray Bentos	- Población Servida: 23.122 habitantes - Disposición: 18,4 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Tipo de residuos: RSD, industriales asimilables a urbanos, escombros, neumáticos.
Young	- Población servida: 15.759 habitantes - Disposición: 12,5 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Operativa: se controla la ubicación de los residuos - Tipo de residuos: RSD, industriales, escombros, neumáticos

Recolección	Fray Bentos	- Recolección de RSU: mediante levante manual de bolsas en tres circuitos durante la noche, seis días a la semana. Cuentan con 4 camiones compactadores y un camión abiertos que es mayormente utilizado para la recolección de residuos especiales: residuos de limpieza, podas, industriales, residuos voluminosos, etc. - Recolección selectiva: el departamento de Río Negro está implementando un plan piloto de recolección selectiva a través del proyecto Más Río Negro. se realiza puerta a puerta con carros tirados por caballos, bicicletas o a mano. Los circuitos limpios se implementaron en junio del 2009 en cuatro barrios de Fray Bentos: Laureles, Matogrosso, Complejo de viviendas colectivas Fray Bentos 2000, Jardín 2 de UPM.
	Young	- Recolección de RSU: se realiza durante seis días a la semana en tres turnos (matutino, vespertino y nocturno). Cuentan con dos camiones compactadores.
Clasificación	Fray Bentos	- Existe un grupo organizado de clasificadores llamado “La Tablada”, conformado por seis personas. Además se sabe que hay veintidós clasificadores no organizados trabajando dentro del SDF, que comercializan los materiales recolectados. Existen otros quince a veinte clasificadores que recolectan los residuos orgánicos o materiales de uso doméstico.
	Young	- En el SDF de Young se encuentran trabajando 10 clasificadores informales.

Tipología de residuos (% en peso)	***Plásticos***	***Papel y cartón***	***Vidrios***	***Hierros***	***Putrescible***	***Textiles***
	24,6	6,8	2,7	2,2	60	3,7

Rivera

Descripción

Se sitúa al noroeste del país y abarca una superficie de 9,370 km^2.
La principal vía de acceso es la Ruta Nacional 5, que une a la capital del departamento, Rivera, con Montevideo.



Población

Localidad	*Nº de habitantes*
Rivera (capital)	76.795
Tranqueras	7.284

Sitios de Disposición final

Rivera	- Población Servida: 76.795 habitantes - Disposición: 66,7 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Tipo de residuos: Urbanos y asimilables a urbanos, envases fitosanitarios, residuos vegetales.
Tranqueras	- Población servida: 7.545 habitantes - Disposición: 4,0 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Tipo de residuos: Urbanos y asimilables a urbanos, envases fitosanitarios.

Recolección	Rivera	- Recolección de RSU: es gestionada por la intendencia y se realiza dos modalidades: en forma manual y con contenedores. Cuentan con tres camiones compactadores y la frecuencia es de seis veces por semana en el centro, mientras que en el resto de las zonas cubiertas es de tres veces por semana. El servicio de limpieza realiza la recolección de residuos especiales: podas, limpieza de ferias y levante de escombros. - Recolección selectiva: existe un plan piloto que consistía en circuitos limpios con recolección puerta a puerta en 20 manzanas del centro de la ciudad. En el 2010 se comenzó a ejecutar un proyecto en el marco de la Ley de Envases, el cual amplía el plan piloto a 400 manzanas.
	Tranqueras	- Recolección selectiva: se realizan circuitos limpios llevados a cabo por una familia con el apoyo de la Junta Local y estudiantes. Se realiza la recolección puerta a puerta y luego es llevada al SDF, donde se realiza la clasificación.
Clasificación	Rivera	- Existe un grupo de cuatro personas que realizan la clasificación y posterior venta de los residuos recolectados en los circuitos limpios. - Además dentro del SDF también se realiza la clasificación y posterior reciclaje de residuos verdes (podas, limpieza de ferias, etc.) provenientes del servicio de limpieza especial. - Los residuos vegetales son recibidos por ocho clasificadores, y se está implementando un proyecto de una planta de compostaje. - Las pilas y los envases de productos agroquímicos también son clasificados dentro del SDF. Además en el SDF de Minas de Corrales (el cual cuenta con una población servida menor a 5.000 habitantes, por ello no se mencionó) se depositan los neumáticos recolectados en todo el departamento. - En el SDF también se da clasificación de forma independiente, directamente en el frente de vertido de residuos.

Rocha	
Descripción	Se sitúa al sureste del país y abarca una superficie de 10.551 km^2. Dentro de las principal vía de acceso encontramos la Ruta Nacional 9, que une las ciudades de Chuy, Castillos y la capital de Rocha con Montevideo, y las rutas 14 y 15.

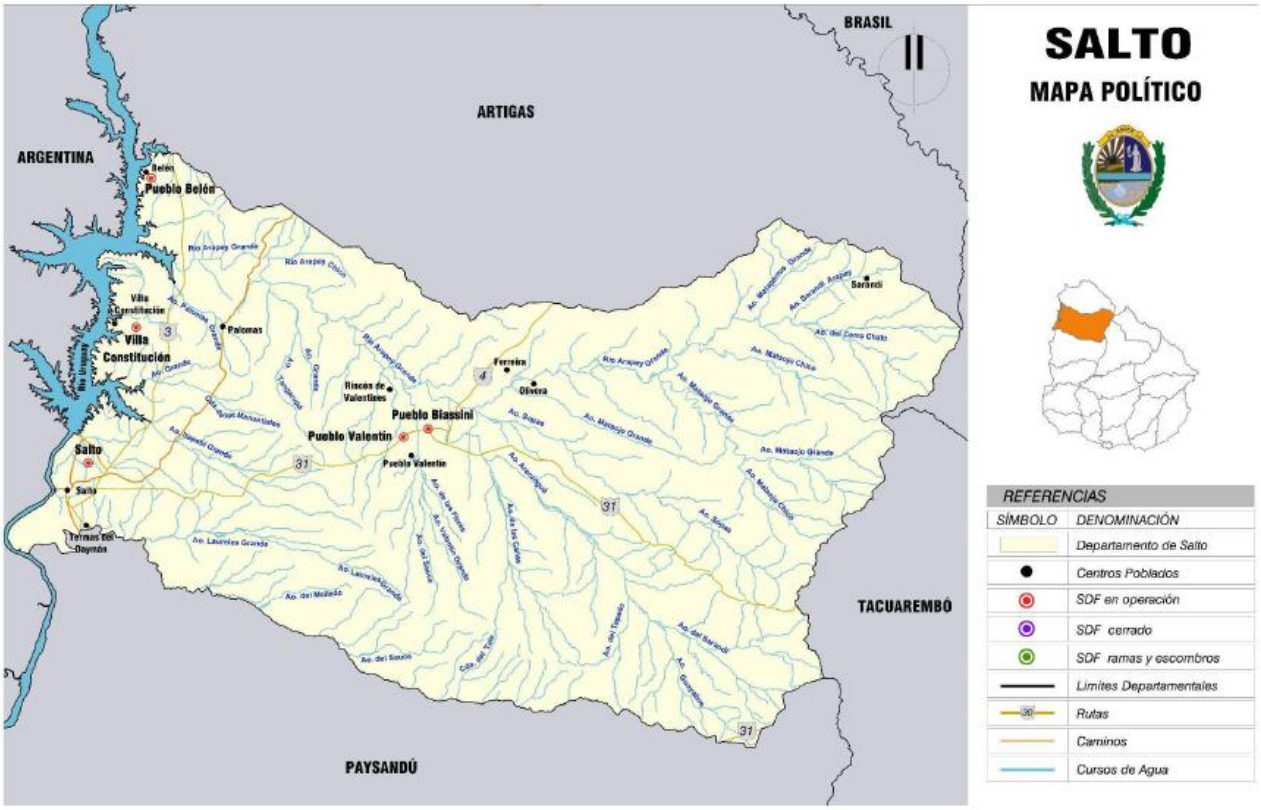




	Localidad	*Nº de habitantes*
Población	Rocha (capital)	25.538
	Chuy	10.401
	Castillos	7.649
	Lascano	6.994

Sitios de Disposición final	Rocha	- Terreno de propiedad privada - Población Servida: 25.795 habitantes - Disposición: 17 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Tipo de residuos: Urbanos, asimilables a urbanos, pilas, neumáticos, y escombros.
	Chuy	- Clausurado en el 2006.
	Castillos	- Población Servida: 7.649 habitantes - Disposición: 6,5 ton/día - Modalidad: sin datos - Tipo de residuos: Urbanos, asimilables a urbanos, pilas, neumáticos, y escombros.

	Lascano	- Población Servida: 6.994 habitantes - Disposición: 5,8 ton/día - Modalidad: sin datos - Tipo de residuos: Urbanos, asimilables a urbanos, pilas, neumáticos, y escombros.
Recolección	Recolección de RSU	- Se realiza mediante contenedores. La intendencia dispone de 110 funcionarios para realizar la recolección de residuos en todas las localidades del departamento. Además cuenta con seis camiones de caja abierta y diez camiones compactadores. Según datos del GD (Gobierno Departamental), el servicio de recolección cubre el 100 % de las zonas urbanas y no se realiza recolección en zonas rurales.
	Recolección Selectiva	- Se implementó un programa piloto en Barra de Valizas y Cabo Polonio, en el marco de la Ley "Tu Envase Nos Sirve". El proyecto consistió en instalar tres islas de recepción y 60 contenedores diferenciados: papel/cartón, envases no retornables y vidrios/latas. El proyecto se lleva a cabo en temporada estival. - Luego se implementó un proyecto que consiste en circuitos "puerta a puerta" en el centro de la ciudad de Rocha, que no funcionó.
Clasificación	- Existe una cooperativa llamada "Amigos Ambientales" conformado por 12 personas que trabajan en circuitos limpios. El material recogido de los circuitos limpios y de los puntos de recepción voluntaria se acopia en un galpón. - En la capital no está permitido el ingreso al SDF por no que no existe clasificación en él.	

Salto	
Descripción	Se sitúa al oeste del país y abarca una superficie de 14.163 km^2. Las principales vías de acceso son las Rutas 3 y 4, que cruzan al departamento de sur a norte y la Ruta 31 que atraviesa al departamento de oeste a este. 

Población	***Localidad***	***Nº de habitantes***
	Salto (capital)	99.072

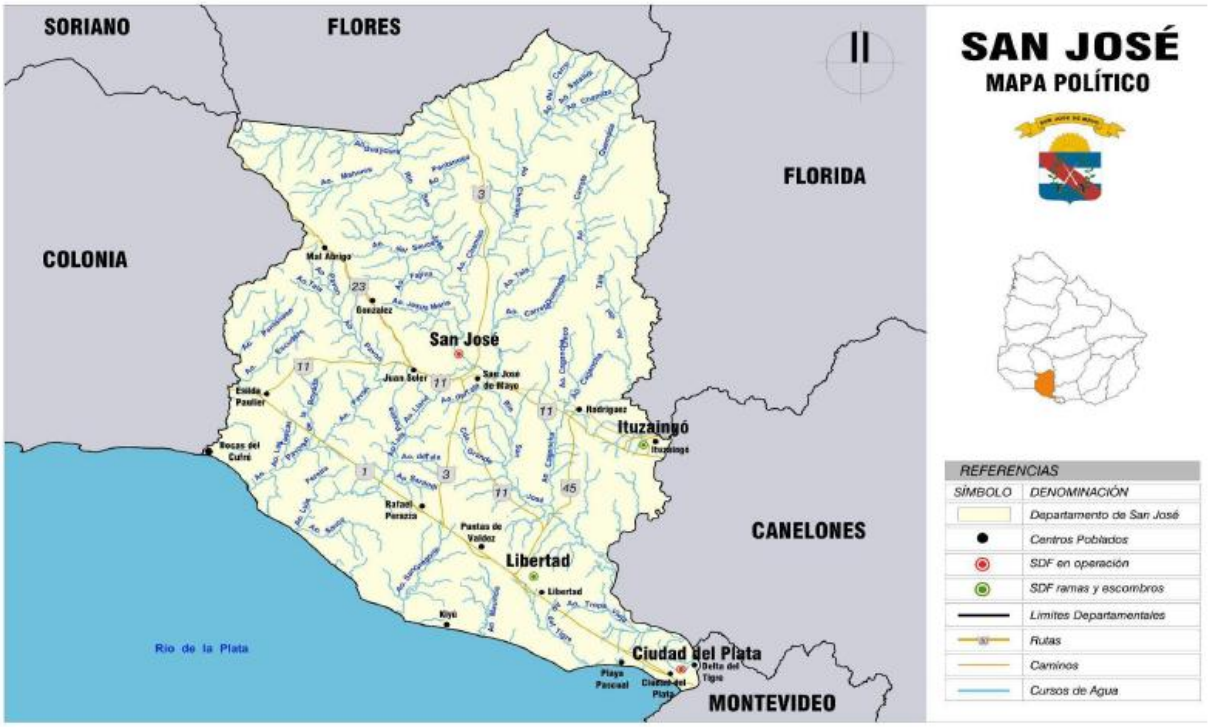
Sitios de Disposición final	Salto	- Población Servida: 99.072 habitantes - Disposición: 80 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Tipo de residuos: Residuos domiciliarios, podas, escombros, neumáticos, industriales.
Recolección	Recolección de RSU	- En la ciudad de Salto es gestionada por la intendencia mediante levante manual de bolsas en tres turnos. Se cuenta con 24 choferes, 40 peones y 7 camiones compactadores. La frecuencia de recolección para el centro y microcentro de la ciudad es diaria durante 6 días a la semana (no se realiza los sábados). En el resto de la ciudad se realiza en horario vespertino, tres veces a la semana. Además la Intendencia de Salto (IdS) se encarga de la recolección de residuos voluminosos, podas, neumáticos fuera de uso, escombros de obras domiciliarias y pilas.
	Recolección Selectiva	- No existe recolección selectiva en la ciudad de Salto.

Clasificación	- Existe un grupo integrado por unas 24 a 26 personas llamado “Las Gaviotas” que trabajarán en la planta de clasificación construida en el SDF. Con la planta instalada se prohíbe la entrada de clasificadores para trabajar en el SDF. - Se estima que hay un grupo de aprox. 20 personas que no han querido integrarse al grupo “Las Gaviotas”, y continúan clasificando en forma individual dentro del SDF. De igual forma estas personas están registradas y autorizadas por la IdS para ingresar a trabajar al SDF.

San José

Descripción

Se sitúa en la zona sur del país y abarca una superficie de 4.992 km^2.
Las principales vías de acceso son la Ruta Nacional 1 y la Ruta 3 que cruzan al departamento de sureste a oeste y de sur a norte respectivamente, y otras rutas nacionales como ser la 11, 23 y 45.



Población

Localidad	*Nº de habitantes*
San José de Mayo (capital)	36.339
Ciudad del Plata	26.582
Libertad	9.196

Sitios de Disposición final

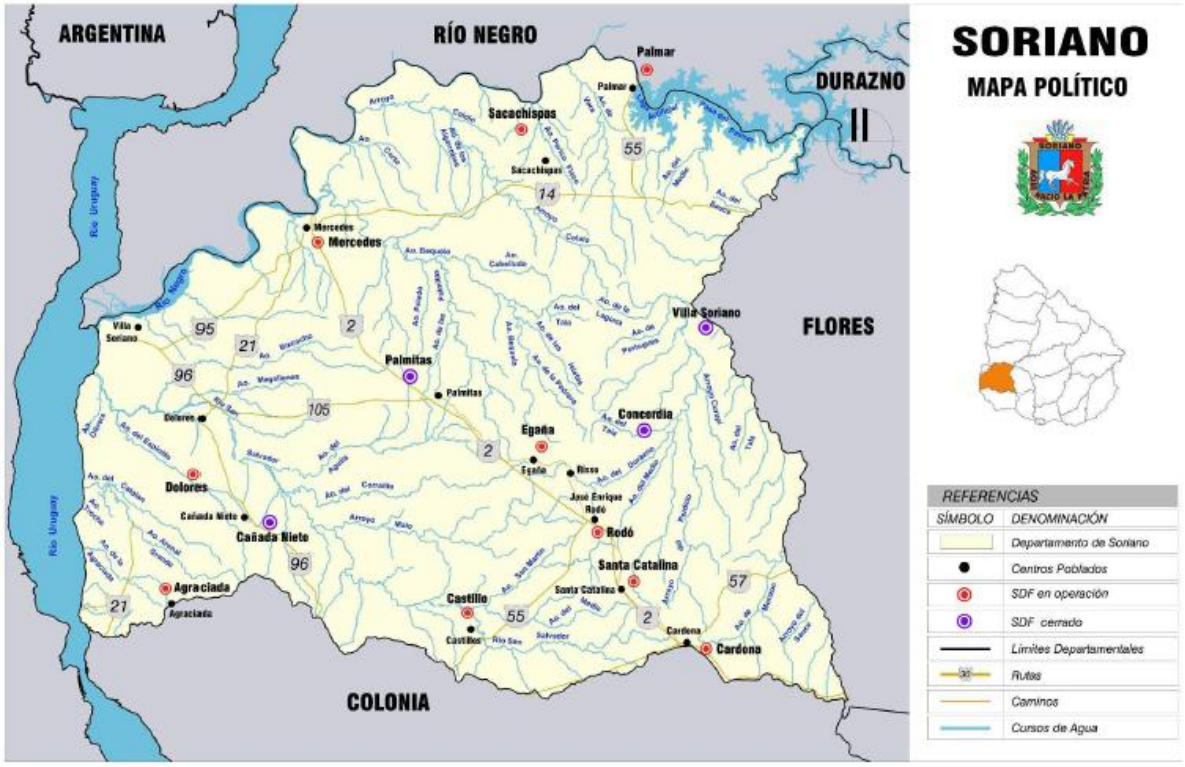
San José de Mayo

- Población Servida: 50.000 habitantes
- Localidades que aportan: San José y resto de centros poblados cercanos.
- Disposición: 50 ton/día
- Operativa: se controla la descarga de los residuos. Compactación y cobertura diaria.
- Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos.

Ciudad del Plata

- Población servida: 31.180 habitantes
- Localidades que aportan: Ciudad del Plata y el 50% de Libertad
- Disposición: 40 ton/día
- Operativa: se controla la descarga de los residuos. Compactación y cobertura diaria.
- Tipo de residuos: RSD, podas, escombros, neumáticos.
- La Intendencia de San Jose (IdSJ) quiere clausurarlo porque se encuentra en zona urbanizada y además existen problemas de vandalismo, pero preve trasladarlo a una zona rural, para lo cual ya se licitó un predio ubicado entre Libertad y Ciudad del Plata y se está evaluando si se construirá un relleno sanitario o un centro de transferencia de residuos.

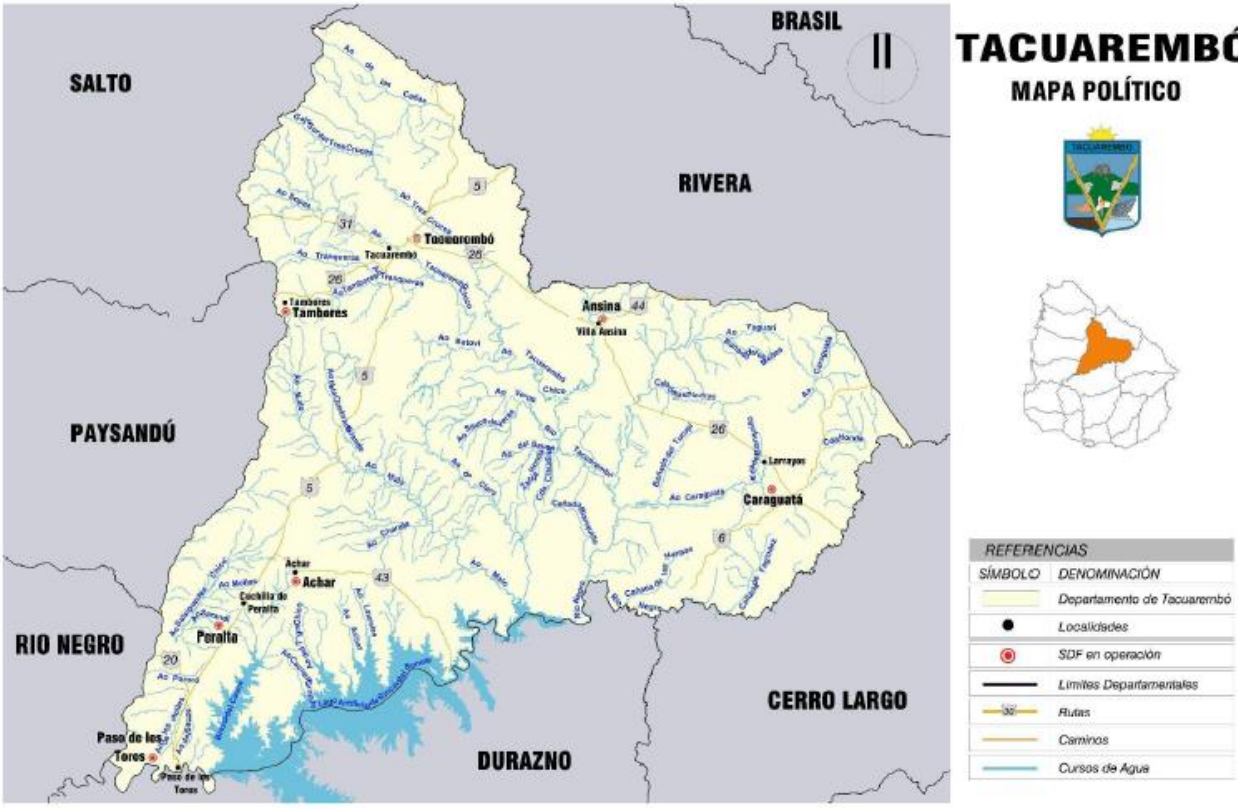
	Libertad	- Clausurado en el 2011. Actualmente está siendo utilizado como SDF de ramas y escombros, aunque según la IdSJ la gente sigue depositando allí los RSD y es el propietario del predio quién permite el acceso. Luego la IdSJ lleva maquinaria y se encarga de acomodar y cubrir los residuos.
Recolección	San José de Mayo	- Recolección de RSU: se utilizan dos sistemas de recolección: por un lado mediante levante manual de bolsas y camiones compactadores y por otro, mediante contenedores de carga lateral. Se cuenta con 50 funcionarios más un jefe de personal y tres camiones de carga lateral, dos camiones lavadores de carga lateral, cinco camiones compactadores y cuatro camiones abiertos. La frecuencia de recolección es diaria, mientras que en el resto de las ciudades se realiza tres veces a la semana. - Recolección selectiva: en el 2009 se llevaba a cabo por un grupo de clasificadores llamados “Don Camino” mediante la modalidad de circuito limpio, aunque no se tiene información sobre el funcionamiento de este grupo. La modalidad de recolección es puerta a puerta y los materiales recolectados (plástico, cartón, vidrio, papel, entre otros) son almacenados en un depósito.
	Ciudad del Plata	- Recolección selectiva: es la única localidad de San José que cuenta con gestión propia para la recolección de residuos. Cuando existan contenedores en la ciudad el servicio de recolección será responsabilidad de la IdSJ.
Clasificación	San José de Mayo	- No se cuenta con información sobre los resultados en cantidad de residuos y en ingresos que obtiene el grupo “Don Camino”. - Existen 60 clasificadores informales trabajando en las calles de la capital departamental, además de una importante cantidad de personas que trabajan en el SDF, totalizando aproximadamente 110 personas.
	Ciudad del Plata	- Hay un grupo de clasificadores organizados que trabajan en el SDF, integrado por unas 14 personas.

Soriano	
Descripción	Se sitúa al oeste del país y abarca una superficie de 9.008 km^2. Las principales vías de acceso son la Ruta Nacional 3, que cruza el departamento de suroeste a noroeste y las rutas 14, 21 y 23. 

	Localidad	*Nº de habitantes*
Población	Mercedes (capital)	42.032
	Dolores	15.753

Sitios de Disposición final	Mercedes	- Población Servida: 43.986 habitantes - Disposición: 30 ton/día - Modalidad: vertedero controlado - Tipo de residuos: Residuos domiciliarios, barrido, limpieza, agrícolas, NFU (Neumáticos Fuera de Uso).
	Dolores	- Población servida: 21.098 habitantes - Disposición: 15 ton/día - Modalidad: vertedero controlado - Tipo de residuos: Residuos domiciliarios, barrido, limpieza, agrícolas, NFU, RAEE.
Recolección	Recolección de RSU	- Se realiza mediante levante manual de bolsas en horario nocturno, fundamentalmente con camiones contratados. La frecuencia es de seis veces por semana en Mercedes, Dolores y Cardona y de dos veces por semana en el resto del departamento. Se cuenta con un total de 88 funcionarios en todo el departamento y 16 personas destinadas al control de las tareas.

	Recolección Selectiva	- Según la Intendencia de Soriano existe un grupo en Dolores, formado por 5 o 6 mujeres que realizan recolección selectiva en comercios y a particulares que se pongan en contacto. Debido al costo del camión que se pone a disposición el municipio, el trabajo no es rentable en estas condiciones. - Además entre el 2009 y 2010 estuvieron en operación diversos grupos del circuito limpio, que a la fecha no continúan.
Clasificación		- Existían tres grupos de clasificación: Mercedes, Cardona y Dolores, de los cuales sólo el último continúa funcionando. - Según la intendencia se estima que en Mercedes existen unos 50 clasificadores, de los cuales aproximadamente 20 clasifican habitualmente en el SDF. En el SDF de Dolores hay unas 5 o 6 personas que trabajan habitualmente allí.

Tacuarembó	
Descripción	Se sitúa en el centro norte del país, al norte del Río Negro. Es el departamento más extenso del territorio oriental con una superficie de 15.438 km^2. La principal vía de acceso es la Ruta Nacional 5, que une a las dos ciudades más importantes del departamento, la capital Tacuarembó y la ciudad Paso de los Toros, y a su vez las comunica con las ciudades de Rivera y Montevideo. 

	Localidad	*Nº de habitantes*
Población	Tacuarembó (capital)	51.224
	Paso de los Toros	13.231

Sitios de Disposición final	Tacuarembó	- Población Servida: 51.669 habitantes - Disposición: 40 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Tipo de residuos: Urbanos, asimilables a urbanos e industriales
	Paso de los Toros	- Población servida: 13.328 habitantes - Disposición: 8,0 ton/día - Modalidad: vertedero a cielo abierto - Tipo de residuos: Urbanos y asimilables a urbanos.

Recolección	Tacuarembó	- Recolección de RSU: es gestionada por la intendencia y existen contenedores en el centro de la ciudad. Además se cuenta con tres camiones compactadores. En el resto de la ciudad la recolección se realiza de forma manual con camiones compactadores y en algunas zonas con camiones abiertos. El servicio en el centro de la ciudad es diario y en el resto de los barrios tres veces a la semana. - Recolección selectiva: un grupo de clasificadores denominado "Águilas del Norte" conformado por 8 personas (para el año 2011). El material recolectado es: plástico, cartón, vidrio, papel, entre otros.
	Paso de los Toros	- Recolección de RSU: la modalidad de la recolección es manual y se realiza con camiones compactadores y camiones abiertos, durante cinco días a la semana. En el resto de las localidades se recogen los residuos con camiones abiertos y con frecuencias que varían entre cuatro y dos veces por semana. - Recolección selectiva: existe un grupo llamado "Clasificadores Horizonte". Según datos del 2011 contaba con 7 integrantes que realizaban un circuito limpio que abarcaba 1000 hogares e instituciones. En los circuitos limpios recolectan principalmente plástico, nylon, cartón y vidrio, que es clasificado y posteriormente vendido.
Clasificación	Tacuarembó	- Además de los grupos de clasificadores mencionados, existe en la capital una empresa recicladora que se encarga de la recolección y reciclado del plástico generado por el Frigorífico Tacuarembó
	Paso de los Toros	- La clasificación es realizada por el mismo grupo que implementa los circuitos limpios. La clasificación se realiza en una planta ubicada en el predio municipal que consiste en un galpón, cedido por el Municipio, que cuenta con balanza, prensa, cinta transportadora y otros servicios para los trabajadores.

Fichas resumen modelos de generación de biogás

A continuación se presentan algunos de los modelos de aplicación más usual para estimar la generación de biogás.

Estimación Estequiométrica	
Modelo	Tchobanoglous
Descripción	Es posible estimar la cantidad total de gas producida a partir de los RS directamente de la reacción estequiométrica pero es necesario tener en cuenta que las condiciones de humedad del relleno afectan significativamente la velocidad y el período de tiempo en que se produce el gas.
Hipótesis y formulación	La fracción orgánica presente en los RS (exceptuando el plástico), se pueden representar genéricamente como $C_aH_bO_cN_d$, entonces se plantea la siguiente relación: $$C_aH_bO_cN_d + \left(\frac{4a-b-2c+3d}{4}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{4a-b-2c+3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{4a-b-2c+3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{4a-b+2c+3d}{8}\right)C0_2 + dNH_2$$ En general se asume que los materiales orgánicos presentes en los RS se pueden dividir en dos, aquellos que se descomponen rápidamente (3 meses a 5 años) y los que se descomponen lentamente (más de 50 años)
Parámetros	- Peso húmedo (kg) de los distintos constituyentes - Peso seco (kg) de los distintos constituyentes - Composición en kg de C, H, O, N, S y cenizas de los distintos constituyentes
Ventajas	- Tiene en cuenta la composición de los residuos, clasificándolos en rápida y lentamente degradables. - Existe un estudio muy completo del método, con gran cantidad de información detallada.

Desventajas	- Sobreestima la cantidad de biogás generada, ya que calcula el potencial optimo de generación a partir del residuo considerado.
Fuente	Gestión Integral de Residuos Sólidos – G. Tchobanoglous. 1992
Ejemplo	Suponiendo $C_{75}H_{122}O_{55}N_1$, se estima una cantidad máxima de gas en condiciones óptimas de 8.75 kg/m^3.

Método de Orden Cero	
Modelo	EPA: Enviromental Protection Agency
Descripción	Se establece en una relación empírica entre la cantidad de basura depositada en el relleno y el flujo de biogás observado en varios proyectos de recuperación de biogás.
Hipótesis y formulación	Se supone que la generación de biogás varía entre 0.05 - 0.20 pies cúbicos (pc) al año, por cada libra (lb) de basura depositada, dando la siguiente relación. $Generacion\ anual\ de\ biogas\ (ft^3) = 0{,}10\ ft^3/lb\ x\ 2000\ \ lb/ton\ \ x\ Basura\ depositada\ (ton)$ En general la EPA recomienda utilizar esta regla solo como un proceso preliminar. Por lo tanto la relación anterior es utilizada solo para la calcular la generación durante un par de años luego de que se comienza a recolectar el gas, de ahí en adelante la EPA recomienda aplicar un factor de disminución anual de entre 2 y 3% a la generación de biogás.
Parámetros	- Cantidad de basura depositada (ton)
Ventajas	- Es útil como primera aproximación de la generación anual de biogás. - Solo se requiere información sobre la cantidad de basura depositada en el SDF.
Desventajas	- No representa con precisión las características de los residuos, el clima y otras variables presentes. - No tiene en cuenta el tiempo que los residuos llevan depositados.
Panilla de cálculo	No
Fuente	Ing. Wagner Colmenares Mayanga & Ing. Karin Santos Bonillla, Generación y Manejo de Gases en Sitios de Disposición Final.

Método de Orden Cero	
Modelo	SWANA: Solid Waste Association of North America
Descripción	Se establece en una relación entre la cantidad de basura depositada en el relleno y la cantidad de metano generada en un vertedero.
Hipótesis y formulación	Se supone que la edad y el tipo de residuos no tienen ningún efecto sobre la producción de biogás, es decir que considera que la liberación de gas, de los residuos depuestos en determinado año, es constante durante el tiempo promedio (supuesto) de degradación de dichos residuos. Plantea la siguiente relación: $$Q = \frac{M \cdot L_0}{(t_0 - t_1)}$$ Siendo *Q* el caudal generado de metano en m^3/año
Parámetros	- M: cantidad de basura depositada (ton). - L_0: Potencial de generación de metano. - t_0: tiempo desde la disposición del residuo y el comienzo de generación de metano (años). - t_1: tiempo de cese de generación (años).
Ventajas	- Tiene en cuenta el potencial de generación de metano. - Supone un tiempo promedio de liberación de biogás de los residuos a pesar de ser un modelo de Orden Cero.
Desventajas	- No representa con precisión las características de los residuos, el clima y otras variables presentes. - No tiene en cuenta el tiempo que los residuos llevan depositados, es decir que no contempla la tasa de decaimiento de metano (k).
Fuente	Análisis comparativo entre los modelos de generación de biogás aplicados a las emisiones de un relleno sanitario en México – F. García Darás; F.J. Colmer Mendoza; F. Robles Martinez; G. Aranda. 2013

Método de Orden Cero	
Modelo	IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
Descripción	El IPCC plantea el "Default Method" para estimar la generación de metano, y además información a nivel mundial en cuanto a los parámetros que incluye el modelo.
Hipótesis y formulación	Se basa en un balance de masa asumiendo que todo el metano es liberado el mismo año que los residuos fueron dispuestos. Plantea la siguiente ecuación: $$QCH_4 = \left(RSU_T \cdot RSU_F \cdot FCM \cdot COD \cdot COD_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} - R\right) \cdot (1 - OX)$$ Siendo QCH_4 las emisiones de metano en Gg/año
Parámetros	- RSU_T: Generación total de RSU (Gg/año) - RSU_F: Fracción de RSU dispuestas en el SDF - FCM: Factor de corrección del metano (varia de 1.0 a 0.4 siendo 0.6 el valor por defecto) - COD: Fracción de carbono orgánico degradable (Gg C/Gg RSU) - COD_F: Fracción de COD no asimilada (Ec. de Tabasaran: DOC_F=0.014T + 0.28; el valor por defecto utilizado es 0.77) - F: Fracción de CH_4 del biogás producido en el SDF (el valor por defecto es 0.5) - R: Cantidad de CH_4 recuperado (Gg/año) - OX: Factor de oxidación (el valor por defecto es 0)
Ventajas	- Tiene en cuenta la composición de los RS que se disponen en el SDF.
Desventajas	- No considera el tiempo de degradación máximo del residuo - Asume que todo el metano es liberado en el año que el RS fue dispuesto - No tiene una buena representación de las emisiones de biogás año a año.
Panilla de	No

cálculo	
Fuente	Jens E. Froiland Jensen & Riitta Pipatti; Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Capitulo 5: Desechos.

Método de Primer Orden	
Modelo	General (empleado en el Relleno Sanitario "Las Rosas")
Descripción	Es un modelo de primer orden, que admite varias fases de degradación para los distintos tipos de residuos. En particular, fue empleado para estimar la producción de biogás en el Rsa Las Rosas, en el cual se consideraron tres velocidades de degradación de los residuos (lenta, media y rápida), cada una de ellas con valores propios de las constantes k y L_0.
Hipótesis y formulación	El modelo asume algunas simplificaciones de la realidad que deben ser tenidas en cuenta para su correcta aplicación: - El relleno no acumula biogás, lo que se genera se emite. - Se proyectan caudales medios anuales, por lo que no es conveniente comparar con datos de la realidad a corto plazo. - No hay cantidades relevantes de residuos industriales con características físico-químicas muy diferentes a las de los RSU, que puedan alterar la generación de metano. - Los residuos comienzan a degradarse luego del primer año de su disposición en el relleno. La humedad media del macizo de residuos es homogénea. La realidad es que hay variaciones en los niveles de humedad en la época seca, y los líquidos dentro del relleno tienden a fluir hacia los pozos de captación. El volumen de metano generado en el año de proyección n (m^3/año) se puede calcular utilizando la siguiente fórmula: $$G_{CH_{4,n}} = \sum_{t=c}^{n-1} k_i L_0 M_{i,t} e^{-ki(n-t)}$$ El tiempo (años) en que se degrada la mitad del residuo, esta dado por la ecuación: $$t_i = \frac{\ln(2)}{k_i}$$ El volumen de metano efectivamente captado en el año de proyección *n* (m^3/año) está dado por la ecuación: $$C_{CH_{4,n}} = \mu_n . G_{CH_{4,n}}$$

Parámetros	- c: año de inicio de la disposición de residuos en la celda de influencia de la red de captación de biogás (c<n) - k_i: tasa de generación de metano de la fracción *i* de residuos [$año^{-1}$] - L_0: potencial máximo de generación de metano [m^3/ton] - $M_{i,t}$: toneladas de residuos sólidos dispuestos o proyectados a disponer de la fracción *i* en el año *t* - μ_n: eficiencia de captación durante el año *n*
Ventajas	- Es un modelo muy similar al LandGEM de la EPA.
Desventajas	- Los parámetros del modelo dependen de algunas características específicas de cada sitio de disposición, que además no son uniformes dentro del mismo relleno, como por ejemplo la temperatura, humedad, composición, edad, estructura y tipo de cobertura.
Panilla de cálculo	No
Fuente	Captura y quema de biogás en Rellenos Sanitarios y su utilización para la generación de energía eléctrica. La experiencia del Relleno Sanitario Las Rosas – P. Zamonsky; S. Bajsa.

Método de Primer Orden	
Modelo	LandGEM: Landfill Gas Emissions Model
Descripción	Permite calcular el total de biogás producido en el sitio de disposición, además estima las emisiones para 46 tipos contaminantes de aire y 3 gases: Metano, Dióxido de Carbono, NMOCs (Non-methane Organic Compounds). Los resultados son expresados en megagramos por año (Mg/año), metros cúbicos por año (m^3/año) y una tercera unidad de elección por el usuario (pies cúbicos promedio por minuto, pies cúbicos por año o toneladas por año).
Hipótesis y formulación	Para calcular las emisiones anuales de los residuos vertidos en un RSa, LandGEM se basa en la siguiente ecuación de primer orden: $$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-k\, t_{i,j}}$$ Siendo QCH_4 la cantidad de metano anual generada en el año del cálculo (m^3/año); *i* el incremento por año; *j* el 0.1 incremento por año; *n* se calcula como: (año del cálculo) – (año de ingreso del residuo); t_{ij} es edad de la j^{esima} fracción de residuos dispuestos (M_i) en el año *i.*
Parámetros	- Características del RSa: año de apertura, año de clausura u opcionalmente el modelo calcula el año de clausura. - k: tasa de generación por año ($año^{-1}$) - L_0: potencial máximo de generación de metano (m^3/Mg) - M_i: cantidad de residuos sólidos dispuestos en el año *i* (Mg/año) - Concentración de NMOC (ppmv de hexano) - Contenido de metano en el biogás (% por volumen)
Ventajas	- Tiene en cuenta la edad del residuo y su comportamiento a lo largo de los años - Representa de forma adecuada la liberación de biogás en el tiempo, tanto para los residuos dispuestos en un determinado año, así como durante la vida útil del SDF.

Desventajas	- Los valores por defecto que presenta el modelo se basan en datos empíricos obtenidos de experiencias en sitios de disposición de Estados Unidos. - No considera detalladamente la composición de los residuos dispuestos en el SDF, ya que la contempla indirectamente en el parámetro L_0.
Planilla de Cálculo	Si
Fuente	Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide – United States Environmental Protection Agency. 2005

Método de Primer Orden	
Modelo	IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
Descripción	Otro método planteado por el IPCC es el "First Orden Decay (FOD)", el cual pretende determinar la cantidad de generación de metano a partir del material depositado en el relleno, que decrece gradualmente con los años y la gestión llevada a cabo en el sitio de disposición final. El cálculo se basa en la cantidad de Carbono Orgánico Degradable (DDOCm por sus siglas en ingles: Descomposable Degradable Organic Carbon). Es la masa de la fracción del carbono orgánico que se degrada bajo condiciones anaerobias en el SDF. La parte del residuo que se descompone bajo condiciones aerobias (etapa previa a alcanzar la condición anaerobia) en el SDF es representada a través de un factor de corrección (MDF)
Hipótesis y formulación	Las emisiones de CH_4 provenientes de la disposición de sólidos en un único año puede ser calculada con la siguiente ecuación: $$CH_4\ emitido\ durante\ el\ año\ t\ (Gg/año) = [CH_4\ generado\ durante\ el\ año\ t - R(t)] \cdot (1 - OX)$$ La cantidad de metano generado se estima a partir de: $$CH_4\ generado\ en\ el\ año\ t\ (Gg/año) = \sum_x \left[(A \cdot k \cdot RSU_T(x) \cdot RSU_F(x) \cdot L_0(x)) \cdot e^{-k(t-x)}\right]$$ Siendo A el factor de normalización que corrige la sumatoria, L_0 (x) el potencial de generación de metano (Gg CH_4/Gg desechos) y k la tasa de generación de metano (año^{-1}). Se determinan como: $$A = \frac{\left(1 - e^{-k}\right)}{k} \qquad L_0 = FCM(x) \cdot COD(x) \cdot COD_F \cdot F \cdot \frac{16}{12}$$ $$k = \frac{ln\ (2)}{t_{1/2}}$$

Parámetros	- R(t): CH_4 recuperado durante el año t del inventario (Gg/año) - OX: factor de oxidación (fracción) - k: constante de reacción - $t_{1/2(x)}$: tiempo de vida medio (años^{-1}) - x: años respecto de los cuales se deben incorporar datos desde el año inicial hasta t - t: año del inventario - RSU_T (x): total de RSU generados en el año x (Gg/año) - RSU_F (x): fracción de los RSU eliminados en los SDF durante el año x - FCM (x): factor de corrección para el metano en el año x (fracción) - COD (x): carbono orgánico degradable en el año x (fracción) (Gg C/Gg desechos) - COD_F: fracción de COD no asimilada - F: fracción por volumen de CH_4 en el biogás generado - 16/12: conversión de C a CH_4
Ventajas	- Existen guías con parámetros ya determinados para regiones y en algunos casos para países.
Desventajas	- Se debe contar con información sobre la composición de los residuos en la localidad, el tipo de operación del relleno, entre otros. - En comparación con el "Default Method" el método FOD brinda mejores estimaciones, sin embargo la cantidad de información necesaria es más compleja y los valores propuestos en la Guía del IPCC son insuficientes.
Planilla de Calculo	Si
Fuente	Jens E. Froiland Jensen & Riitta Pipatti; Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Capitulo 5: Desechos.

Método Multifase	
Modelo	IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
Descripción:	Es un modelo de primer orden multifase que calcula, el contenido de carbono y la constante k de cada tipo de residuos. La variable L_0, no se utiliza explícitamente, ya que el contenido de carbono degradable se usa para el cálculo de la producción de metano y la emisión.
Hipótesis y formulación:	Calcula las emisiones de metano en toneladas por año a partir de la descomposición de biodegradables de carbono en los residuo, aplicando la siguiente ecuación: $BE_{CH4,SWDS,y} = \varphi(1-f)GWP_{CH4}(1 - OX)\frac{16}{12}F.DOC_f.MCF\sum_{x=1}^{y}\sum_{j}W_{j,x}.\ DOC_J.e^{-k_j(y-x)}.\left(1-.e^{-k_j}\right)$
Parámetros:	- $BE_{CH4,SWDS,y}$: es la generación de metano del relleno sanitario. - φ: la corrección del modelo, factor que tiene en cuenta las incertidumbres del modelo - f: la fracción de metano capturado en el vertedero - GWP_{CH4}: el potencial de Calentamiento Global (GWP) del metano - OX: el factor de oxidación, refleja la cantidad de metano del vertedero que es oxidado en el suelo o en el material de cubrición. - F: la fracción de volumen de metano en el gas del vertedero - DOC_f: la fracción biodegradable que puede descomponerse - MCF: el factor de corrección de metano - $W_{j,x}$: la cantidad de toneladas de residuos orgánicos tipo j dispuesto en el vertedero en el año x - DOC_j: la fracción biodegradable (en peso) del tipo de residuos j - k_j: la velocidad de disminución para el tipo de residuos j - x: el año durante el periodo de acreditación

Ventajas:	- Permite obtener una mejor estimación de la producción de biogás, ya que incorpora distintas constantes en función de las características de degradación de los residuos.
Desventajas:	- Requiere de información detallada en cuento a la composición de los residuos.
Planilla de Cálculo	Si
Fuente:	IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5, Chapter 3. 2006. (https://www.ipcc.ch/meetings/session25/doc4a4b/vol5.pdf)

Método Multifase	
Modelo:	Centroamericano (EPA)
Descripción:	Es un modelo de primer orden multifase que provee automáticamente para el país seleccionado la composición de los residuos. A su vez, permite calcular los valores de k y L_0 en base a información (incluida en el modelo) sobre el clima y la composición de residuos de RSa representativos de las ciudades en Centroamérica. Los países para los cuales se tiene información disponible son: Nicaragua, México, Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá. Para desarrollar el modelo se evaluaron otros modelos como el Modelo Mexicano de Biogás, el IPCC, entre otros. Por lo tanto, el Modelo Centroamericano incorpora conceptos de los distintos modelos.
Hipótesis y formulación:	Estima la generación de biogás en un año dado a partir de la misma ecuación que utiliza el Modelo LandGEM de la U.S EPA versión 3.02: $$Q_M = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} 2kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right)\left(e^{-kt_{ij}}\right)$$ Asume un periodo de seis meses desde la colocación de los residuos y el comienzo de generación de biogás. Además, por cada unidad de residuos, luego de seis meses, la generación disminuye exponencialmente mientras la fracción orgánica es consumida.
Parámetros:	- Q_M: Generación de biogás (m^3/año) - i: Incremento de año 1 - n: (Año del caculo) – (Año en que se dispuso residuos) - j: incremento de 0.1 años - k: índice de generación de metano ($año^{-1}$) - L_0: Generación potencial de metano (m^3/Mg) - M_i: masa de residuos depositados en el año i - T_{ij}: edad de la sección j de masa de residuos depositados en el año i
Ventajas:	- Considera dos categorías de valores de k y L_0, según los tiempos de degradación de los residuos (rápido o lento).

Desventajas:	- No permite ingresar información de un país que no pertenezca a América Central o diferente a los nueve mencionados.
Planilla de Cálculo	Si
Fuente:	G. Alex Stege, *et al*, Manual de Usuario Modelo Centroamericano de Biogás, Marzo 2007. (http://www3.epa.gov/lmop/international/centroamericano.html)

http://www3.epa.gov/lmop/documents/pdfs/manual_del_usuario_modelo_mexicano_de_biogas_v2_2009.pdf

Donde:

Muchos de estos parámetros pueden ser determinados mediante tablas según la localización (continente/país).



UBICACIÓN



REFERENCIAS

RUTA NACIONAL 2

RUTA NACIONAL 21

RUTA NACIONAL 21

SITIO DE EMPLAZAMIENTO
DEL RELLENO

PROYECTO:
RELLENO SANITARIO REGIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA - UDELAR

CONTENIDO:

Plano general y ubicación del sitio de emplazamiento del relleno

DOCENTES:

Dr. Ing. José Cataldo
Dra. Ing. Elizabeth González
MSc. Ing. Nicolás Rezzano

ESTUDIANTES:

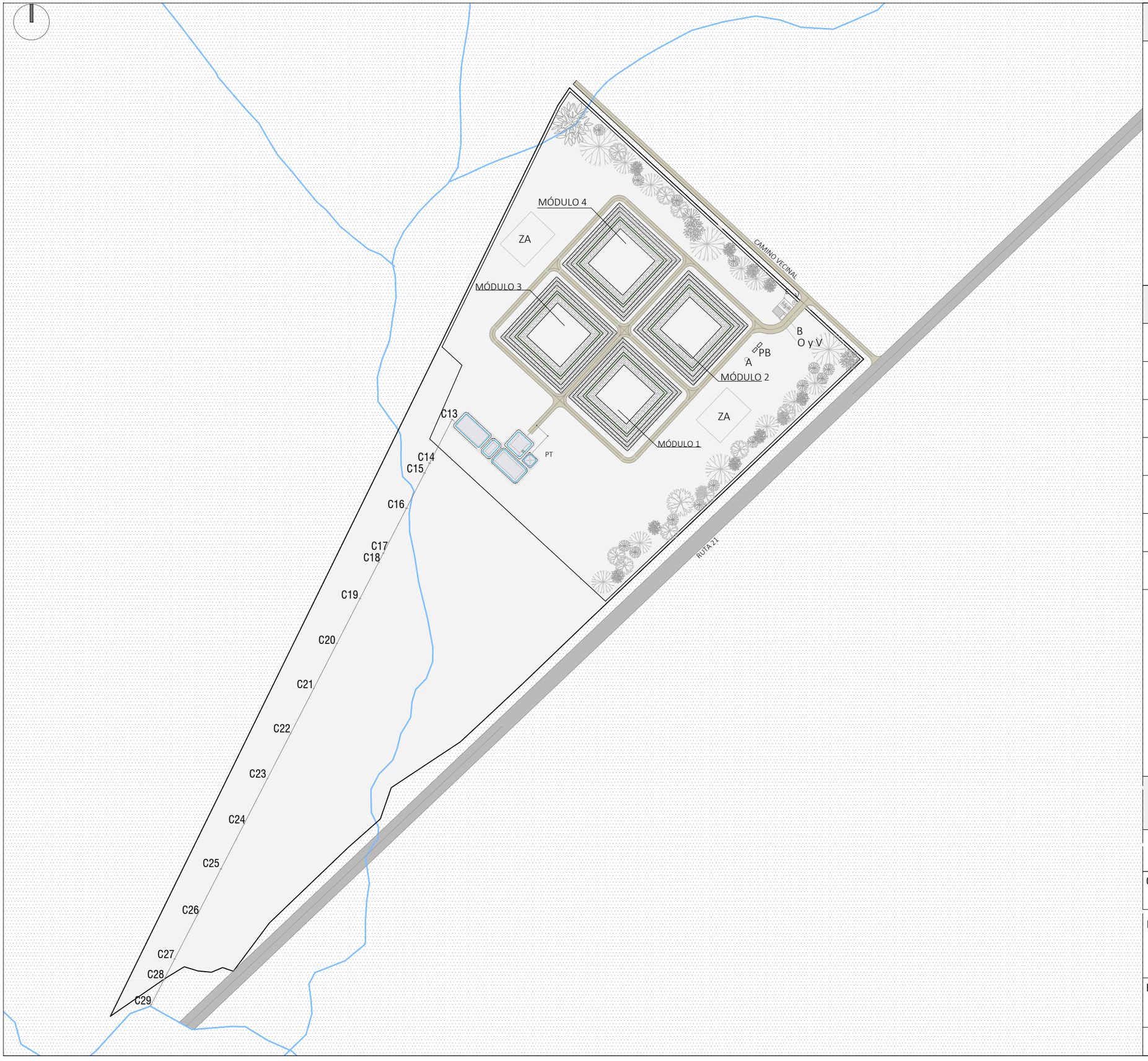
Verónica Garicoits
Luciana Pan

FECHA:
Julio 2016

ESCALA:
1/200000

LÁMINA:

L1



UBICACIÓN



REFERENCIAS

CORTINA ARBÓREA	
CERCO OLÍMPICO	
CAMINERÍA DE TOSCA	
ÁREA ÚTIL	
TALUDES MÓDULOS	
EJES DE CALLE	
BERMA	

E: Estacionamiento

B: Balanza

O y V: Oficinas y Vestuarios

V: Vigilancia

PB: Planta de Biogás

A: Antorcha

ZA: Zona de acopio de material

PT: Planta de Tratamiento de Lixiviado

PROYECTO:
RELLENO SANITARIO REGIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA - UDELAR

CONTENIDO:

Planta general de las instalaciones

DOCENTES:

Dr. Ing. José Cataldo
Dra. Ing. Elizabeth González
MSc. Ing. Nicolás Rezzano

ESTUDIANTES:

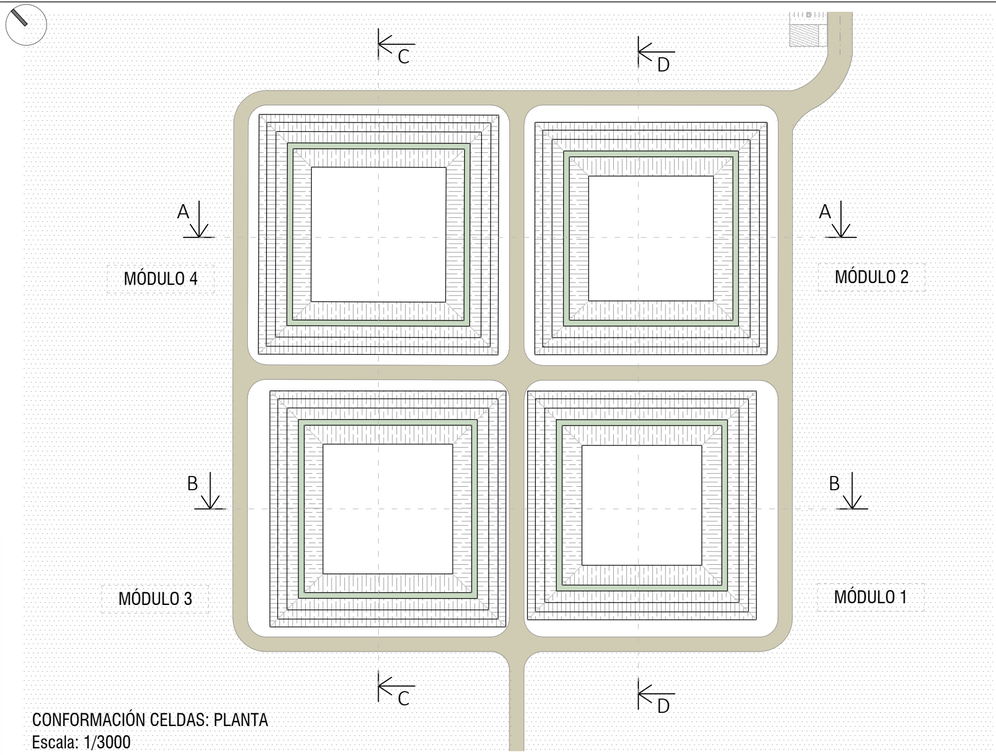
Verónica Garicoits
Luciana Pan

FECHA: Julio 2016

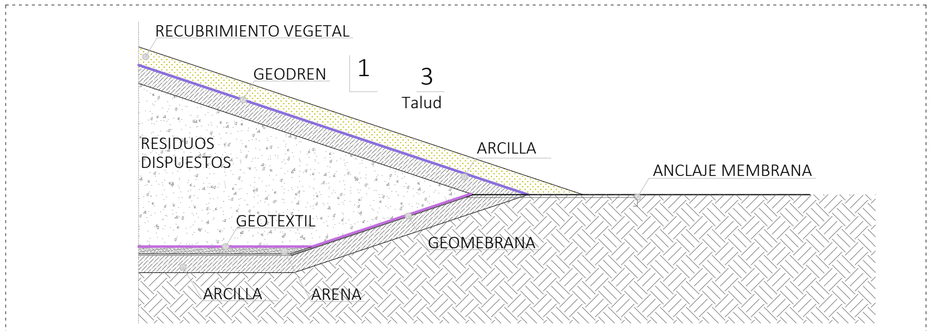
ESCALA: 1/7500

LÁMINA:

L2

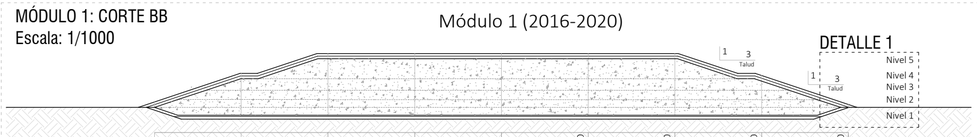


CONFORMACIÓN CELDAS: PLANTA
Escala: 1/3000



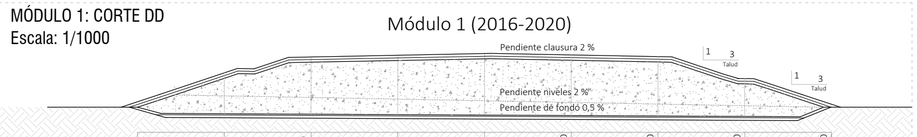
DETALLE 1: Impermeabilización de fondo y clausura
Escala: 1/150

MÓDULO 1: CORTE BB
Escala: 1/1000



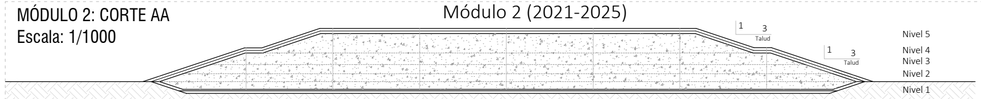
Progresiva (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00
Profundidad (m)	1.27	9.63	14.22	14.22	14.22	14.22	14.22	9.14	0.65
Cota Clausura (m)	56.27	57.83	62.42	62.42	62.42	62.42	62.42	57.35	50.65

MÓDULO 1: CORTE DD
Escala: 1/1000



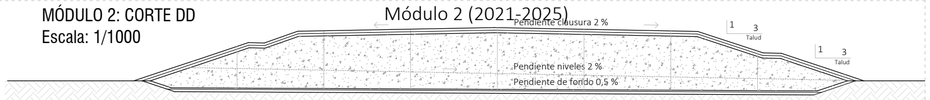
Progresiva (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00
Profundidad (m)	0.00	9.42	13.21	13.61	14.22	13.95	13.57	8.51	0.60
Cota Clausura (m)	0.00	57.93	61.60	61.99	62.37	62.05	61.66	56.61	50.60

MÓDULO 2: CORTE AA
Escala: 1/1000



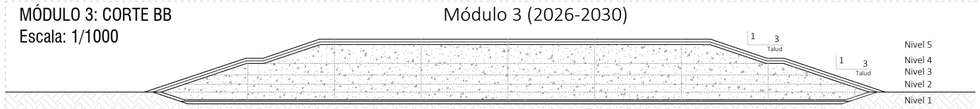
Progresiva (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00
Profundidad (m)	1.27	9.60	14.06	14.06	14.06	14.06	14.06	9.60	1.76
Cota Clausura (m)	56.27	57.21	62.27	62.27	62.27	62.27	62.27	57.81	51.51

MÓDULO 2: CORTE DD
Escala: 1/1000



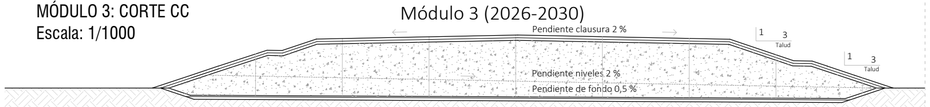
Progresiva (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00
Profundidad (m)	0.00	9.61	13.31	13.70	14.06	13.97	13.68	9.15	1.02
Cota Clausura (m)	0.00	57.99	61.53	61.92	62.27	61.89	61.50	56.87	51.20

MÓDULO 3: CORTE BB
Escala: 1/1000



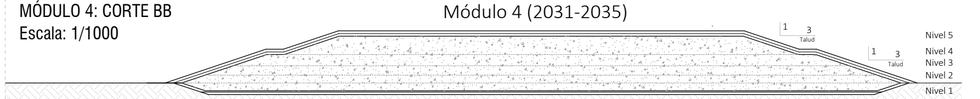
Progresiva (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00
Profundidad (m)	1.27	9.58	13.97	13.97	13.97	13.97	13.97	9.58	3.41
Cota Clausura (m)	51.27	57.78	62.17	62.17	62.17	62.17	62.17	57.78	52.32

MÓDULO 3: CORTE CC
Escala: 1/1000



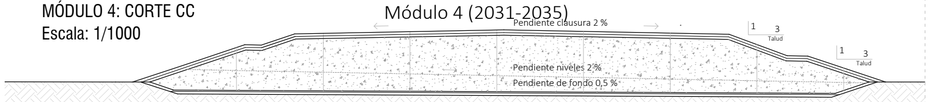
Progresiva (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00
Profundidad (m)	0.00	9.61	13.21	13.61	14.25	13.92	13.63	9.96	3.43
Cota Clausura (m)	0.00	57.92	61.51	61.90	62.22	61.83	61.45	57.68	52.28

MÓDULO 4: CORTE BB
Escala: 1/1000



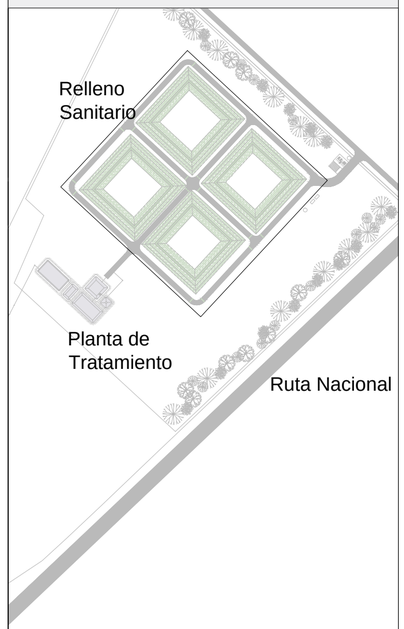
Progresiva (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00
Profundidad (m)	1.27	9.58	13.97	13.97	13.97	13.97	13.97	9.58	3.41
Cota Clausura (m)	51.27	57.78	62.17	62.17	62.17	62.17	62.17	57.78	52.32

MÓDULO 4: CORTE CC
Escala: 1/1000



Progresiva (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00
Profundidad (m)	0.00	9.82	13.22	13.61	13.78	13.97	13.68	11.15	5.15
Cota Clausura (m)	0.00	57.93	61.20	61.59	61.98	61.65	61.26	58.63	53.20

UBICACIÓN



REFERENCIAS

TALUDES MÓDULOS

CAMINERÍA DE TOSCA

BERMA

DETALLE 1:

GEOMEMBRANA
PEAD 15 mm

GEODREN
Paquete membrana impermeable y dren

GEOTEXTIL

COBERTURA VEGETAL
Espesor 60 cm

ARCILLA
Espesor 60 m, K = $1x10^{-7}$cm/s

ARENA
Espesor 30 cm

TERRENO

PROYECTO:
RELLENO SANITARIO REGIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA - UDELAR

CONTENIDO:
Plantas y cortes de módulos, configuración final

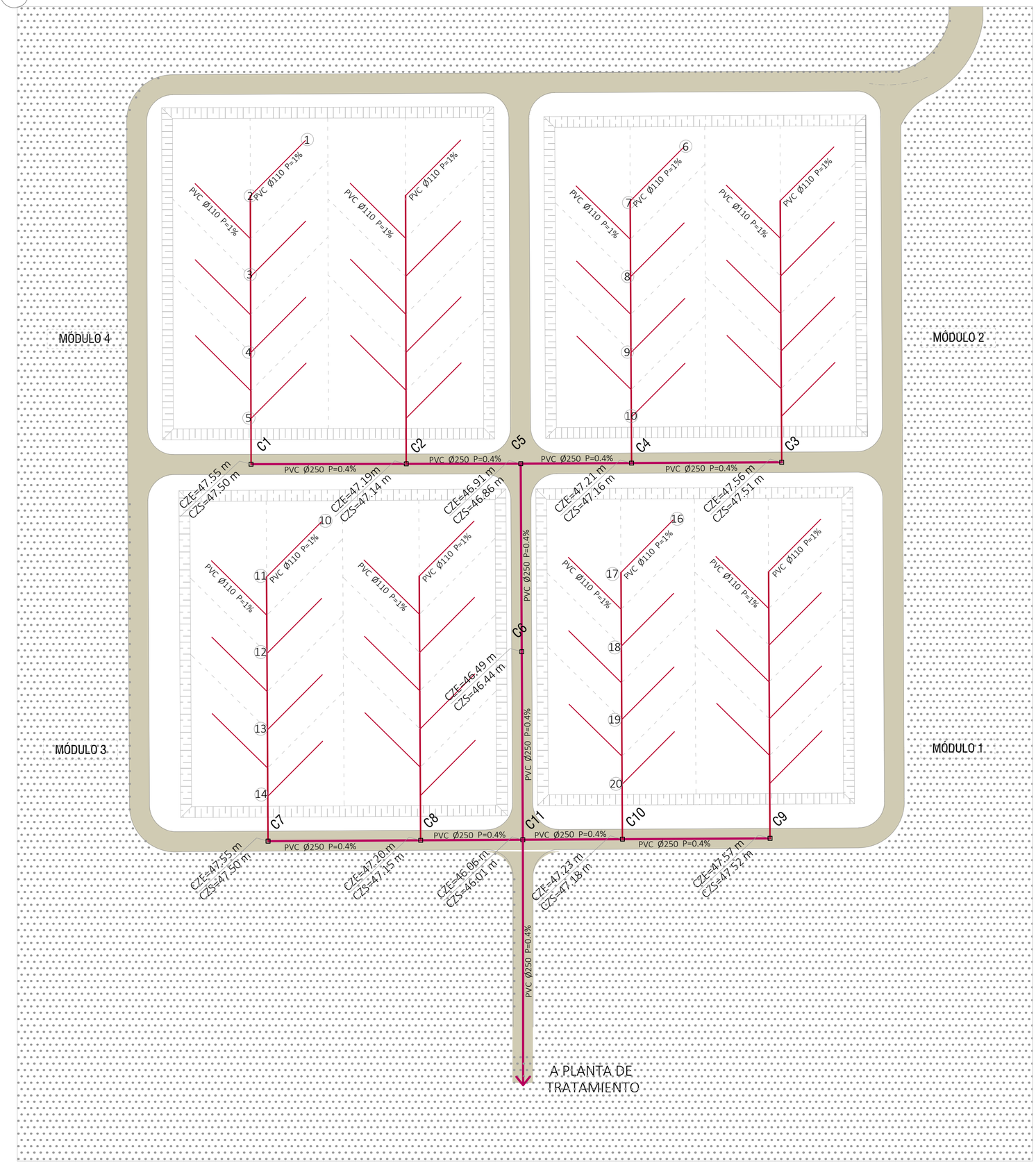
DOCENTES:
Dr. Ing. José Cataldo
Dra. Ing. Elizabeth González
MSc. Ing. Nicolás Rezzano

ESTUDIANTES:
Verónica Garicoits
Luciana Pan

FECHA: Julio 2016

ESCALA: VARIAS

LÁMINA: L3

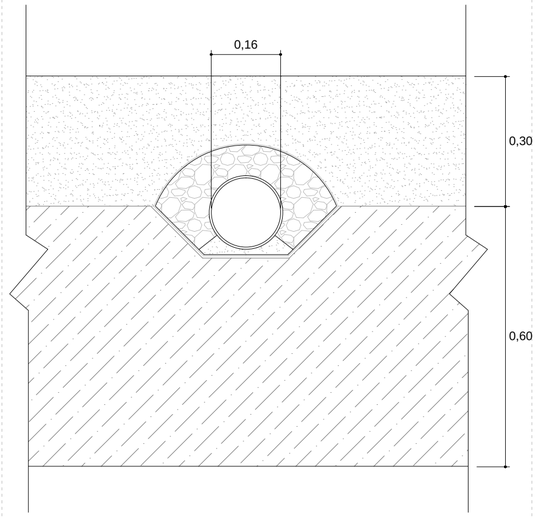


COTAS DE ZAMPEADO

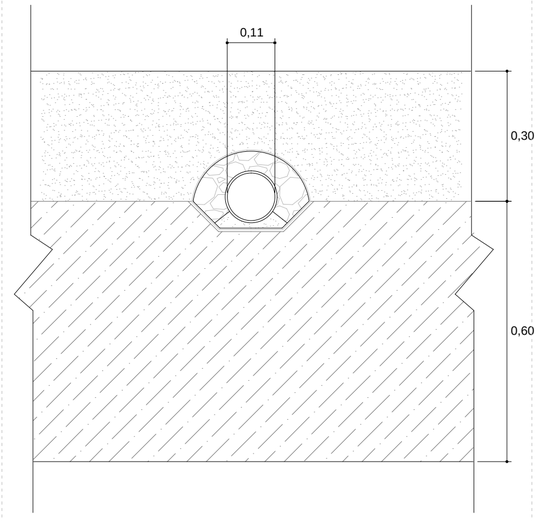
1- CZ=48,60m	11- CZ=48,60m
2- CZ=48,24m	12- CZ=48,21m
3- CZ=48,01m	13- CZ=48,02m
4- CZ=47,82m	14- CZ=47,83m
5- CZ=47,66m	15- CZ=47,56m
6- CZ=48,60m	16- CZ=48,60m
7- CZ=48,21m	17- CZ=48,24m
8- CZ=48,02m	18- CZ=48,06m
9- CZ=47,83m	19- CZ=47,87m
10- CZ=47,67m	20- CZ=47,71m

NOTA: Todas las cotas están referidas al cero oficial.

DETALLE 1: Dren principal
Escala: 1/10



DETALLE 2: Dren secundario
Escala: 1/10



UBICACIÓN



REFERENCIAS

CÁMARAS

ÁREAS DE APORTE

TUBERÍAS SECUNDARIAS
Perforadas de PVC, Ø 110, pendiente 1 %

TUBERÍAS PRINCIPALES
PVC, Ø 160, pendiente 0.5 %

TUBERÍAS TERCIARIAS
PVC, Ø 250, pendiente 0.4 %

ARCILLA

ARENA

PIEDRA PARTIDA

GEOMEMBRANA
PEAD 15 mm

GEODREN
Membrana impermeable y dren

NOTAS

Todas las cotas están referidas al cero oficial

PROYECTO:
RELLENO SANITARIO REGIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA - UDELAR

CONTENIDO:
Captación y conducción de lixiviado

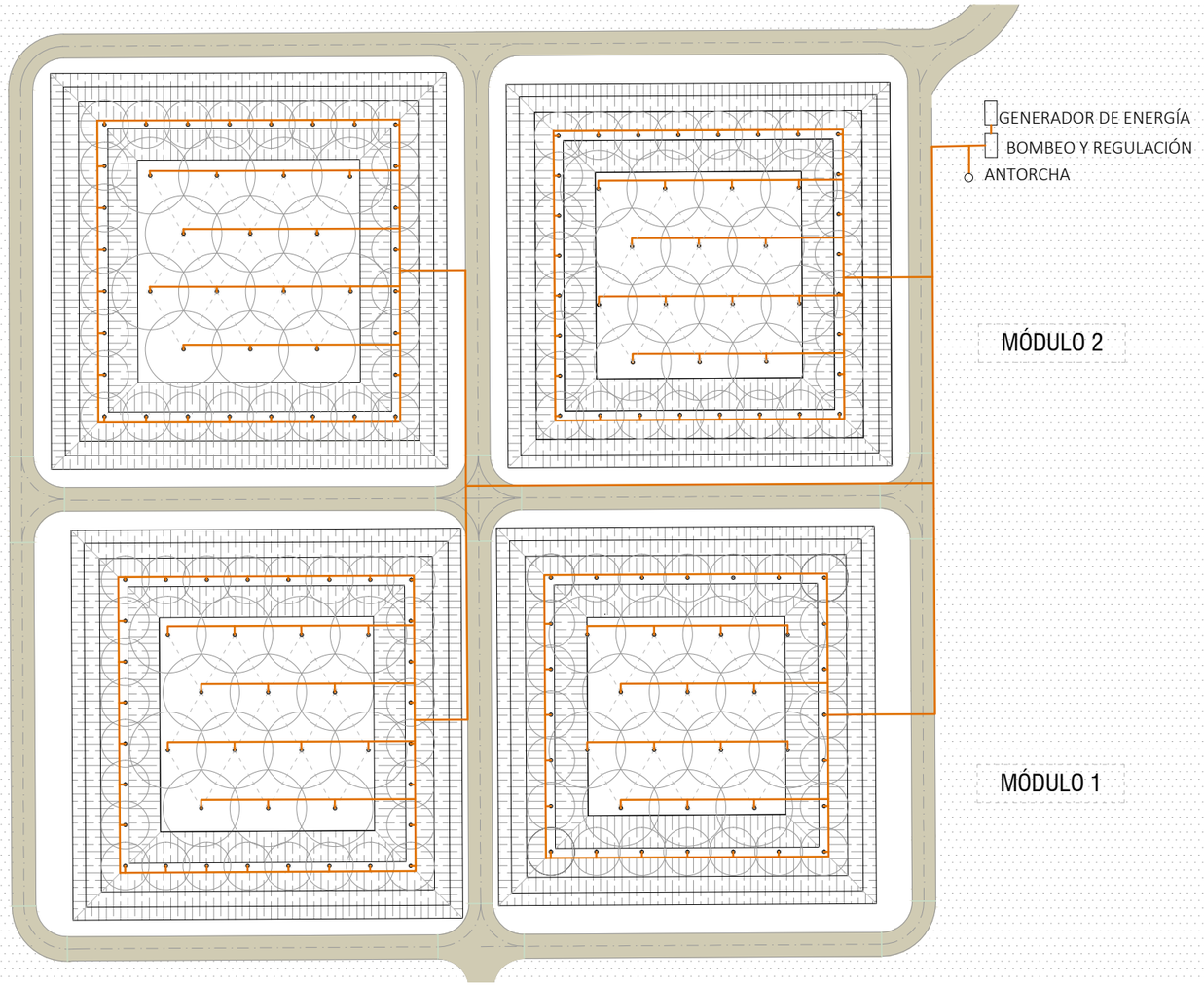
DOCENTES:
Dr. Ing. José Cataldo
Dra. Ing. Elizabeth González
MSc. Ing. Nicolás Rezzano

ESTUDIANTES:
Verónica Garicoits
Luciana Pan

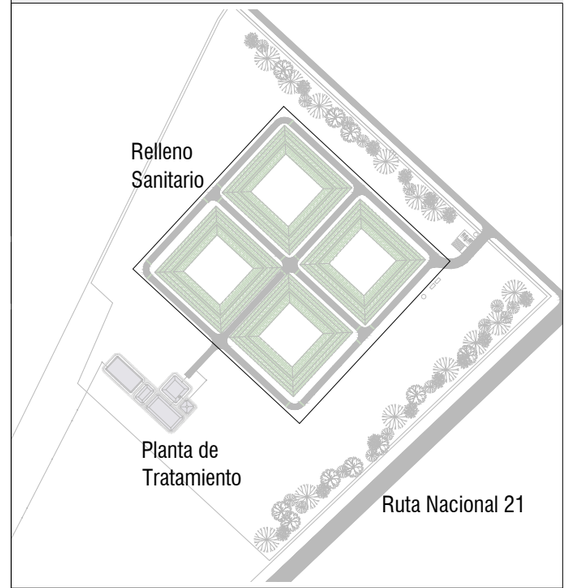
FECHA: Julio 2016

ESCALA: 1/1500

LÁMINA: L4



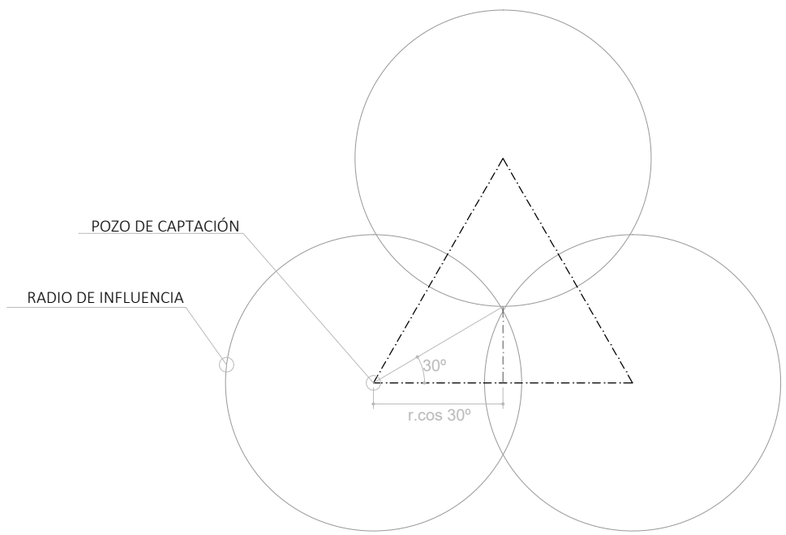
UBICACIÓN



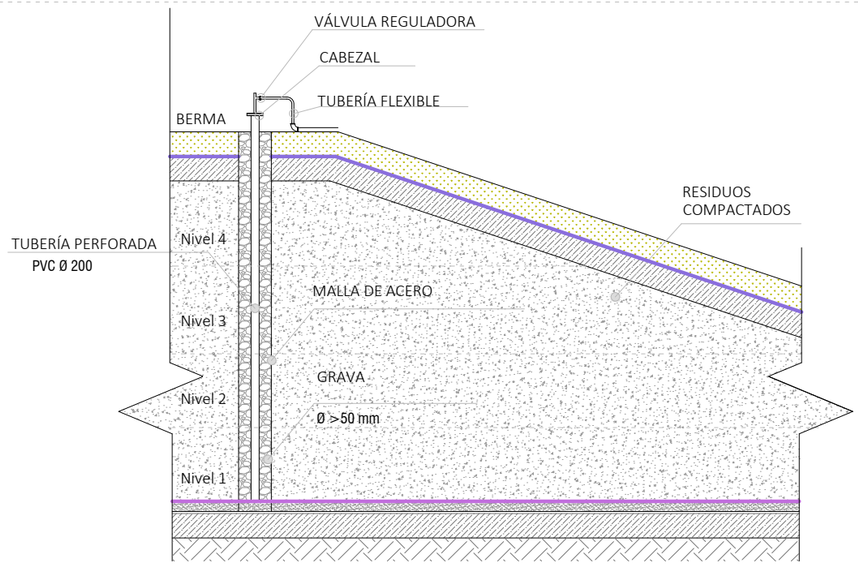
REFERENCIAS

TUBERÍAS DE RECOLECCIÓN BIOGÁS	
RADIOS DE INFLUENCIA	
ÁREA ÚTIL	
TALUDES MÓDULOS	
COBERTURA VEGETAL	
ARCILLA	
ARENA	

DETALLE: Distribución pozos



DETALLE: Pozos de captación de biogás
Escala: 1/150



PROYECTO:
RELLENO SANITARIO REGIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA - UDELAR

CONTENIDO:
Conducciónes y captación de biogás

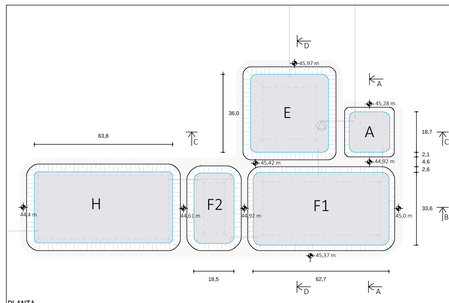
DOCENTES:
Dr. Ing. José Cataldo
Dra. Ing. Elizabeth González
MSc. Ing. Nicolás Rezzano

ESTUDIANTES:
Verónica Garicoits
Luciana Pan

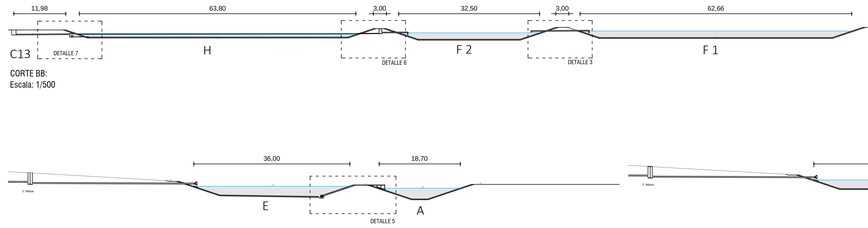
FECHA: Julio 2016

ESCALA: 1/2500

LÁMINA: L5

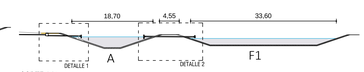


PLANTA
Escala: 1/1000

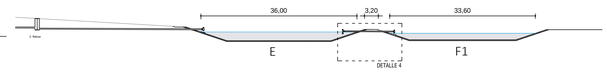


CORTE BB:
Escala: 1/500

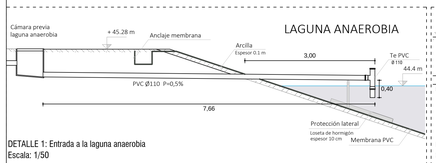
CORTE CC:
Escala: 1/500



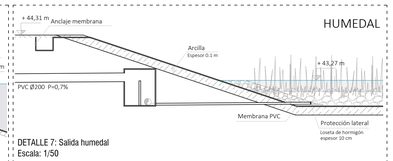
CORTE AA:
Escala: 1/500



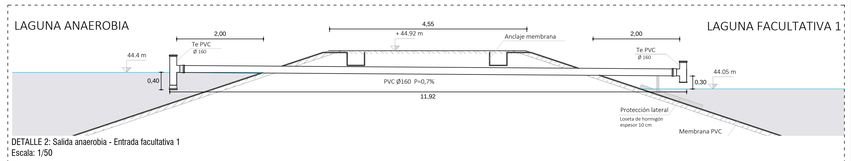
CORTE DD:
Escala: 1/500



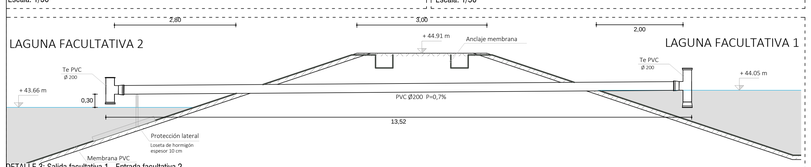
DETALLE 1: Entrada a la laguna anaerobia
Escala: 1/50



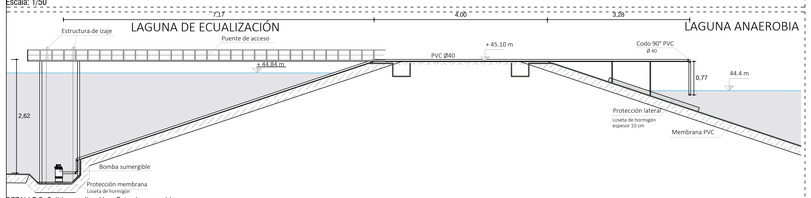
DETALLE 7: Salida humedal
Escala: 1/50



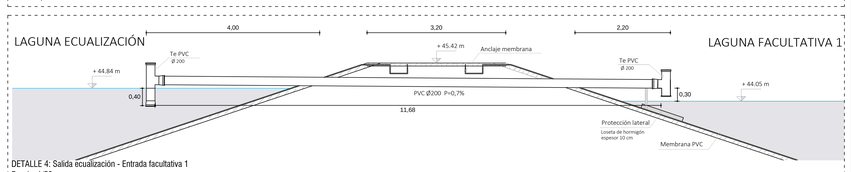
DETALLE 2: Salida anaerobia - Entrada facultativa 1
Escala: 1/50



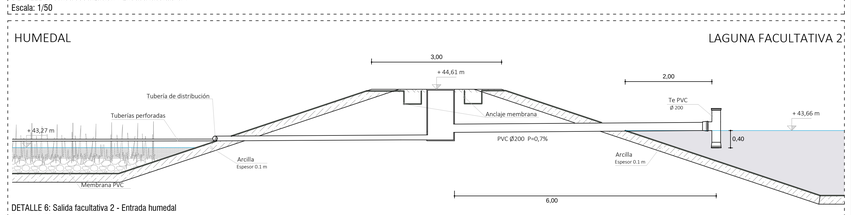
DETALLE 8: Salida facultativa 1 - Entrada facultativa 2
Escala: 1/50



DETALLE 5: Salida ecualización - Entrada anaerobia
Escala: 1/50



DETALLE 4: Salida ecualización - Entrada facultativa 1
Escala: 1/50



DETALLE 6: Salida facultativa 2 - Entrada humedal
Escala: 1/50

UBICACIÓN



REFERENCIAS

REVANCHA	
CORONAMIENTO	
ARCILLA	
PELO DE AGUA	
MEMBRANA PVC	

NOTA:
Todas las cotas están referidas al cero oficial
Unidades en metros

PROYECTO:
RELLENO SANITARIO REGIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA - UDELAR

CONTENIDO:
Planta de Tratamiento

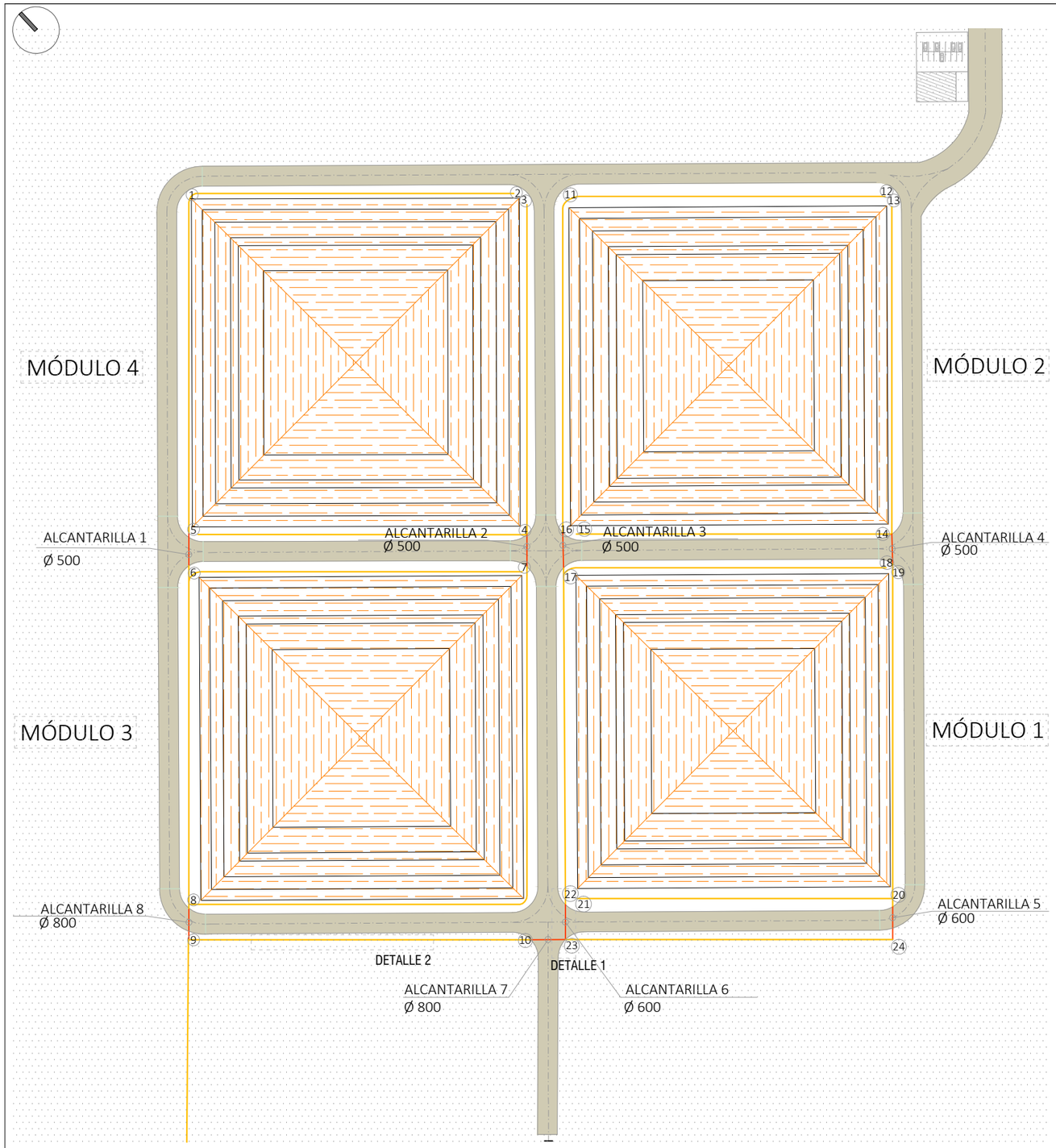
DOCENTES:
Dr. Ing. José Catalá
Dra. Ing. Elizabeth González
MSc. Ing. Nicolás Rezzano

ESTUDIANTES:
Verónica Gancoda
Luciana Pan

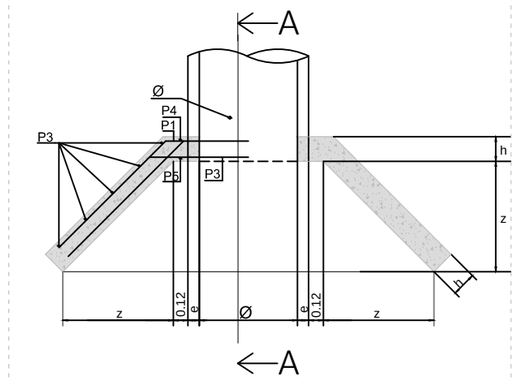
FECHA:
Julio 2016

ESCALA:
VARIAS

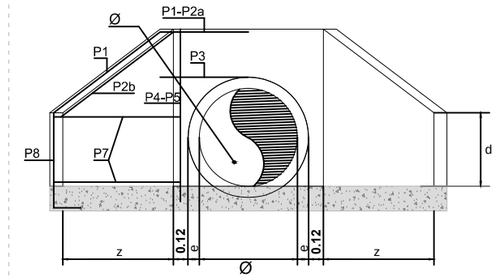
LÁMINA:
L6



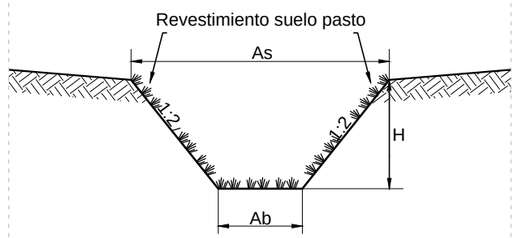
DETALLE 1: CORTE ALCANTARILLAS TIPO
Escala: 1/500



Corte A-A



DETALLE 2: Cunetas empastadas

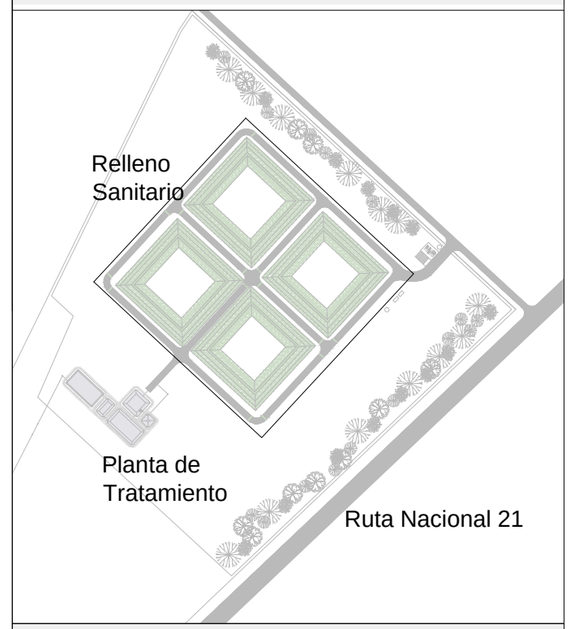


As (m)	Ab (m)	H (m)
1,9	0,3	0,4
2,3	0,3	0,5
2,7	0,3	0,6

TABLA: Dimensiones alcantarillas tipo

N° BOCAS	SECCIÓN DESAGUE	DIMENSIONES						ARMADURAS	LONGITUD TUBERÍAS
		e	b	h	t	z	d	P1-P2a-P2b-P3-P4-P5-P6-P7-P8	
1	0,20	7	15	20	20	70	30	ϕ8	1 (X + 0,30)
1	0,28	7,5	15	20	20	70	30	ϕ8	1 (X + 0,30)
1	0,50	9,2	20	30	25	90	60	ϕ10	1 (X + 0,40)

UBICACIÓN



REFERENCIAS

CUNETAS EMPASTADAS

ALCANTARILLAS

CUENCAS DE APORTE

COTAS DE ZAMPEADO

1- CZ=48,9m	13- CZ=49,6m
2- CZ=49,6m	14- CZ=48,9m
3- CZ=49,6m	15- CZ=49,6m
4- CZ=48,9m	16- CZ=48,1m
5- CZ=48,1m	17- CZ=47,9m
6- CZ=47,9m	18- CZ=48,6m
7- CZ=48,6m	19- CZ=48,7m
8- CZ=47,1m	20- CZ=47,9m
9- CZ=46,9m	21- CZ=47,2m
10- CZ=46,7m	22-CZ=47,1m
11- CZ=48,9m	23- CZ=46,9m
12- CZ=49,6m	24- CZ=47,7m

NOTA: Todas las cotas están referidas al cero oficial.

PROYECTO:
RELLENO SANITARIO REGIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA - UDELAR

CONTENIDO:
Sistema de drenaje de pluviales

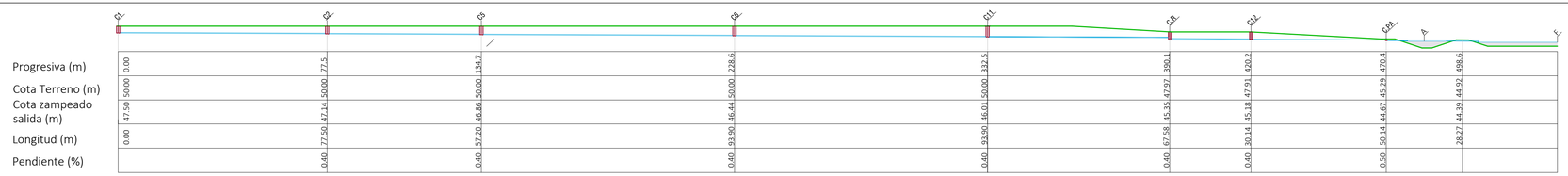
DOCENTES:
Dr. Ing. José Cataldo
Dra. Ing. Elizabeth González
MSc. Ing. Nicolás Rezzano

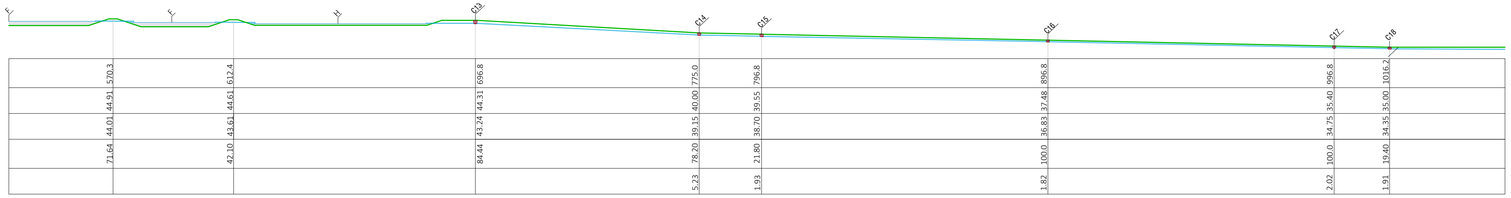
ESTUDIANTES:
Verónica Garicoits
Luciana Pan

FECHA: Julio 2016

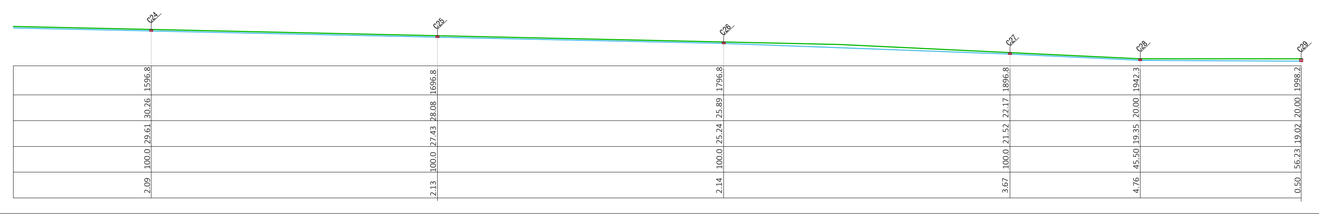
ESCALA: 1/2500

LÁMINA:
L7

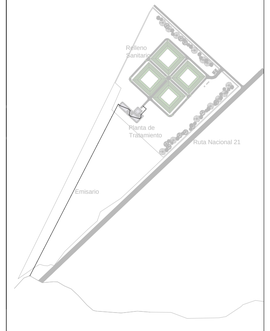








UBICACIÓN



REFERENCIAS

NIVEL TERRENO

CÁMARAS

PERFIL HIDRÁULICO

PROYECTO:
RELLENO SANITARIO REGIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA - UDELAR

CONTENIDO:
Perfil Hidráulico desde Cámara 1 hasta Cámara 29

DOCENTES:
Dr. Ing. José Cataldo
Dra. Ing. Elizabeth González
MSc. Ing. Nicolás Rezzano

ESTUDIANTES:
Verónica Garicoits
Luciana Pan

FECHA:
Junio 2016

ESCALA:
1/1000

LÁMINA:
L8