



Universidad de la República
Facultad de Ingeniería



Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental

Planta de Tratamiento de Lixiviados del Sitio de Disposición Final de la Ciudad de Montevideo (Vertedero Felipe Cardoso)

Caracterización del Lixiviado

Informe Final
Proyecto Ingeniería Civil perfil Hidráulica-Ambiental

Noviembre 2013

Tutores:

M.Sc. Ing. Leonel Crosignani

M.Sc. Ing. Juan Sanguinetti

Estudiantes:

Nicolás Cunha

Santiago Pereira

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	9
1.1	SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL FELIPE CARDOSO	9
1.2	LIXIVIADOS.....	12
1.3	RELLENO SANITARIO	13
1.4	VERTEDERO.....	13
2	CÁLCULO DE CAUDAL DE LIXIVIADO	14
2.1	MODELOS DE GENERACIÓN DE LIXIVIADOS EN RELLENOS SANITARIOS.....	14
2.2	MODELO DEL HELP.....	15
2.2.1	<i>Descripción del modelo</i>	15
2.2.2	<i>Parámetros de entrada</i>	16
2.2.3	<i>Valores considerados</i>	21
2.2.4	<i>Análisis de resultados</i>	24
2.3	MODELO DEL PROFESOR TCHOBANOGLIOUS.....	27
2.3.1	<i>Descripción de los componentes del modelo</i>	28
2.3.1.1	Balance de aguas del Vertedero	29
2.3.2	<i>Parámetros de entrada utilizados para el modelo</i>	30
2.3.2.1	Humedad inicial de los residuos.....	30
2.3.2.2	Densidad del suelo de tapada	31
2.3.2.3	Fracción correspondiente a tapada	31
2.3.2.4	Precipitación efectiva.....	31
2.3.2.5	Precipitación efectiva luego de cierre de celda (Porcentaje lluvia efectiva luego de tapada final)	31
2.3.2.6	Producción de gas	31
2.3.2.7	Capacidad de campo de los residuos	31
2.3.2.8	Características generales del Vertedero	32
2.3.3	<i>Hipótesis consideradas</i>	34
2.3.4	<i>Resultados obtenidos</i>	34
2.3.4.1	Parámetros utilizados (celdas C y D).....	34
2.3.4.2	Resultados celdas C y D de Usina 8	36
2.3.4.3	Análisis de sensibilidad de parámetros.....	37
2.4	ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO	39
2.4.1	<i>Situación del Vertedero al momento de las mediciones</i>	39
2.4.2	<i>Proceso de toma de mediciones</i>	40
2.4.2.1	Período de medición	40
2.4.2.2	Instrumentación.....	40
2.4.3	<i>Análisis de los datos</i>	41
2.4.3.1	Análisis de períodos de tiempo seco.....	41
2.4.3.2	Análisis de períodos de tiempo lluvioso.....	46
2.4.3.3	Análisis de períodos de tiempo seco y lluvioso eliminando aporte de agua pluvial	48
2.4.4	<i>Estimación de caudal máximo de lixiviados en el futuro por extrapolación de datos</i>	50
2.5	MEDIDAS ESTIMADAS DE CAUDAL REALIZADAS EN EL AÑO 2013	51
2.6	COMPARACIÓN DE DIFERENTES CAUDALES OBTENIDOS.....	52
2.7	CAUDAL DE DISEÑO PARA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS	54
3	CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO	56
3.1	FASES DEL PROCESO DE DEGRADACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN UN VERTEDERO.....	56
3.2	COMPOSICIÓN DE LIXIVIADOS	58
3.2.1	<i>Análisis de información previa de lixiviados del Vertedero Felipe Cardoso</i>	61
3.2.1.1	Datos aportados por Intendencia de Montevideo	61

3.2.1.2	Datos aportados por la empresa Espina Obras Hidráulicas	69
3.2.2	<i>Estudios de campo</i>	81
3.2.2.1	Plan de muestreo	81
3.2.2.2	Resultados obtenidos.....	84
3.2.2.3	Análisis de resultados obtenidos en campo.....	84
3.2.3	<i>Resumen caracterización de lixiviado</i>	85
3.2.3.1	Valores de parámetros adoptados para el diseño de la planta de tratamiento	87
4	BIBLIOGRAFÍA	88

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Propiedades de los suelos y geomembranas según su clasificación del modelo HELP	20
Tabla 2-2 Propiedades de arcilla, residuos y geomembrana para las celdas C y D de la usina 8	22
Tabla 2-3 Caudales obtenidos por el modelo HELP	26
Tabla 2-4 Parámetros de entrada utilizados para el modelo del profesor Tchobanoglous	30
Tabla 2-5 Parámetros de entrada utilizados para el modelo del profesor Tchobanoglous	30
Tabla 2-6 Parámetros de entrada utilizados para el modelo del profesor Tchobanoglous	30
Tabla 2-7 Parámetros utilizados para el modelo del Tchobanoglous.....	34
Tabla 2-8 Áreas de zonas pertenecientes a celdas C y D	34
Tabla 2-9 Altura de las capas consideradas	35
Tabla 2-10 Caudales por zona obtenidos para las celdas C y D según el modelo de Tchobanoglous ..	36
Tabla 2-11 Áreas de usinas 6, 7 y usina 8 celdas A y B	36
Tabla 2-12 Resumen de resultado de caudales obtenidos por el modelo del Tchobanoglous	36
Tabla 2-13 Análisis de sensibilidad de parámetros.....	37
Tabla 2-14 Caudales para tiempo seco período 25 a 28 de Diciembre del 2011	43
Tabla 2-15 Caudales para tiempo seco período 9 a 12 de Diciembre del 2011	43
Tabla 2-16 Resumen de caudales en ambas cámaras considerando el tiempo seco y lluvioso, eliminando los posibles aportes de escorrentía directa aportado por la celda D de la Usina 8, impermeable en el momento de las mediciones.	50
Tabla 2-17 Cálculo de caudal máximo para celdas C y D por extrapolación de valores medidos	51
Tabla 2-18 Resumen de caudales obtenidos por el HELP.	54
Tabla 2-19 Diseño de laguna de ecualización	55
Tabla 3-1 Valores típicos de parámetros para lixiviados según(1)	57
Tabla 3-2 Datos típicos sobre la composición de los lixiviados de Vertederos nuevos y maduros (Tchobanoglous)	58
Tabla 3-3 Variación de la composición de lixiviados para diferentes edades de Rellenos Sanitarios norteamericanos según (2).....	59
Tabla 3-4 Variación de la composición de lixiviados generados en Rellenos Sanitarios brasileros según (2).....	60
Tabla 3-5 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviados 7.1 y 7.2.....	62
Tabla 3-6 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviados 7.3	62
Tabla 3-7 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.1.....	65
Tabla 3-8 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.1.....	66
Tabla 3-9 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.2.....	66
Tabla 3-10 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.4.....	66
Tabla 3-11 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.5.....	66
Tabla 3-12 Comparación de valores de lixiviado 7.1 de usina 7 con valores típicos según fases de descomposición	69
Tabla 3-13 Comparación de valores de lixiviado 7.2 de usina 7 con valores típicos según fases de descomposición	69
Tabla 3-14 Datos aportados por la empresa Espina. Lixiviado proveniente de usinas 6 y 7	71
Tabla 3-15 Datos aportados por empresa Espina. Lixiviado en cámara 1, tiempo seco	73
Tabla 3-16 Datos aportados por empresa Espina. Lixiviado en cámara 1, tiempo de lluvia	73
Tabla 3-17 Datos aportados por empresa Espina. Lixiviado en cámara 2, tiempo seco	74

Tabla 3-18 Datos aportados por empresa Espina. Parámetros para cámara 2, en función de los picos de caudal.....	74
Tabla 3-19 Datos aportados por empresa Espina. Lixiviado cámara 2, tiempo de lluvia	75
Tabla 3-20 Resultados obtenidos en muestreo realizado el 9/5/2013.....	84
Tabla 3-21 Resultados obtenidos en campo el 9/5/2013	84
Tabla 3-22 Valores de parámetros representativos de usina 8 celdas C y D. (ESPINA).....	86
Tabla 3-23 Valores de parámetros representativos de usina 8 celdas A y B. (ESPINA).....	86
Tabla 3-24 Valores de parámetros representativos de usinas 6 y 7 (IM)	86
Tabla 3-25 Valores de parámetros representativos de usinas 6 y 7 (ESPINA).....	87
Tabla 3-26 Valores de parámetros representativos de usinas 6, 7 y 8 (Medidos en campo).....	87
Tabla 3-27 Valores de parámetros adoptados para el diseño de la planta de tratamiento.....	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema de un perfil típico de Relleno Sanitario.....	16
Figura 2-2 Esquema de representación en HELP celdas C y D de la Usina 8	22
Figura 2-3 Esquema de representación en HELP celdas A y B de la Usina 8.....	23
Figura 2-4 Esquema de representación en HELP de las Usinas 6 y 7.....	24
Figura 2-5 Esquema de modelo del profesor Tchobanoglous	27
Figura 2-6 Esquema de balance de aguas para una celda de Vertedero.....	28
Figura 2-7 Esquema de disposición de residuos celdas C y D.....	32
Figura 2-8 Cámaras de aforo y muestreo utilizadas por Espina	40
Figura 2-9 Esquema de vertedero instalado en Cámara 1.....	41
Figura 2-10 Esquema de vertedero instalado en Cámara 2.....	41
Figura 3-1 Imagen satelital aportada por la Intendencia de Montevideo con diferentes puntos de toma de muestras.....	61
Figura 3-2 Puntos de muestreo de usinas 5, 6 y 7 de empresa Espina.....	70

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 2-1 Resultado Modelo HELP para celdas C y D de la Usina 8	24
Gráfica 2-2 Modelo HELP para celdas A y B de la Usina 8	25
Gráfica 2-3 Modelo HELP para usinas 6 y 7	26
Gráfica 2-4 Caudales obtenidos por el modelo del Tchobanoglous para el vertedero completo.....	37
Gráfica 2-5 Análisis de sensibilidad de parámetros.....	38
Gráfica 2-6 Caudal en tiempo seco. Período 9 a 11 de Diciembre de 2011	42
Gráfica 2-7 Caudal en tiempo seco. Período 25 a 28 de Diciembre de 2011	42
Gráfica 2-8 Caudal registrado en Cámara 2 durante 24hs de tiempo seco para distintos días.....	43
Gráfica 2-9 Caudal registrado en Cámara 1 durante 24hs de tiempo seco para distintos días.....	44
Gráfica 2-10 Precipitaciones durante el período 15 a 19 de Diciembre de 2011.....	46
Gráfica 2-11 Caudales registrados durante el período 15 a 19 de Diciembre de 2011	46
Gráfica 2-12 Superposición precipitación-caudal en día 15 de Diciembre de 2011.....	47
Gráfica 2-13 Superposición precipitación-caudal en día 17 de Diciembre de 2011.....	47

Gráfica 2-14 Superposición precipitación-caudal durante la segunda quincena de Diciembre de 2011	48
Gráfica 2-15 Superposición precipitación-caudal en el período 20 a 25 de Diciembre de 2011.....	49
Gráfica 2-16 Superposición precipitación-caudal durante el día 22 de Diciembre de 2011	49
Gráfica 2-17 Superposición precipitación-caudal en la tarde del día 23 y el día 24 de Diciembre de 2011	50
Gráfica 3-1 DBO Y DQO medidos por la IM para lixiviado 7.1	63
Gráfica 3-2 N-NH ₃ medido por la IM para lixiviado 7.1.....	63
Gráfica 3-3 P _{total} medido por la IM para lixiviado 7.1.....	64
Gráfica 3-4 Cr medido por la IM para lixiviado 7.1	64
Gráfica 3-5 DBO Y DQO medidos por la IM para lixiviado 8.1	67
Gráfica 3-6 N-NH ₃ medido por la IM para lixiviado 8.1.....	67
Gráfica 3-7 P total medido por la IM para lixiviado 8.1	68
Gráfica 3-8 Cr medido por la IM para lixiviado 8.1	68
Gráfica 3-9 pH medido por Espina para tiempo seco	76
Gráfica 3-10 DBO medido por Espina para tiempo seco	76
Gráfica 3-11 DQO medido por Espina para tiempo seco	77
Gráfica 3-12 DBO/DQO medido por Espina para tiempo seco	77
Gráfica 3-13 N-NH ₄ medido por Espina para tiempo seco.....	78
Gráfica 3-14 P _{total} medido por Espina para tiempo seco.....	78
Gráfica 3-15 Cr medido por Espina para tiempo seco	79
Gráfica 3-16 Comparación valores cámara 2 con norma 253/79 vigente	80
Gráfica 3-17 Comparación valores medidos en campo con valores de IM y ESPINA	84

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1-1 Vista de la celda C, usina 8	11
Fotografía 1-2 Relleno de celda D, usina 8	11
Fotografía 1-3 Lixiviado y aguas pluviales dirigidas hacia Arroyo Díaz.....	13
Fotografía 2-1 Medición de caudal en cámara 2	52
Fotografía 2-2 Descarga del lixiviado	52
Fotografía 3-1 Fotografía de tuberías de conducción de lixiviados hacia "cámara 2"	81
Fotografía 3-2 Funcionario de Espina tomando muestra de lixiviado para pH	83
Fotografía 3-3 Funcionario de Espina tomando muestras del lixiviado proveniente de usinas 6,7 y 8(celdas A y B) con envase de refresco.....	83
Fotografía 3-4 Organización de muestras en heladera.....	84

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2-1 Cuadro comparativo de resultados de diferentes métodos de cálculo de caudal	53
--	----

1 Introducción

1.1 Sitio de Disposición Final Felipe Cardoso

El sitio de disposición final (SDF) de residuos sólidos de la ciudad de Montevideo, se encuentra ubicado en el cruce de las calles Felipe Cardoso y Camino Cepeda. Su construcción y gestión es responsabilidad de la Intendencia de Montevideo.

Este SDF está compuesto por las usinas 5, 6, 7 y 8.

La usina 5, con un área de 22,7 hectáreas fue clausurada en el año 1990 y según estudios realizados ésta no genera más lixiviados.

Las usinas 6 y 7, con un área de 29,5 hectáreas, fueron clausuradas en el año 2002.

La usina 8, con un área de 35,2 hectáreas esta subdividida en 4 celdas: A, B, C y D. Las celdas A y B se encuentran, con su capacidad colmada y con cobertura definitiva, y las celdas C y D, en operación desde Mayo del 2011 deberán operar hasta Julio del 2016, cuando está prevista su clausura.

Existe un sistema de extracción de biogás de las usinas 6,7 y 8(celdas A y B) en fase operativa, y la empresa a cargo de ese proyecto (Aborgama) es la encargada de coleccionar y conducir el lixiviado de estas usinas hacia la planta de tratamiento. Dicha empresa estima un caudal máximo de 8 l/s de lixiviado a conducir a la planta.

En la siguiente imagen extraída de bibliografía (1), se puede observar la distribución de usinas y celdas en el Vertedero Felipe Cardoso.

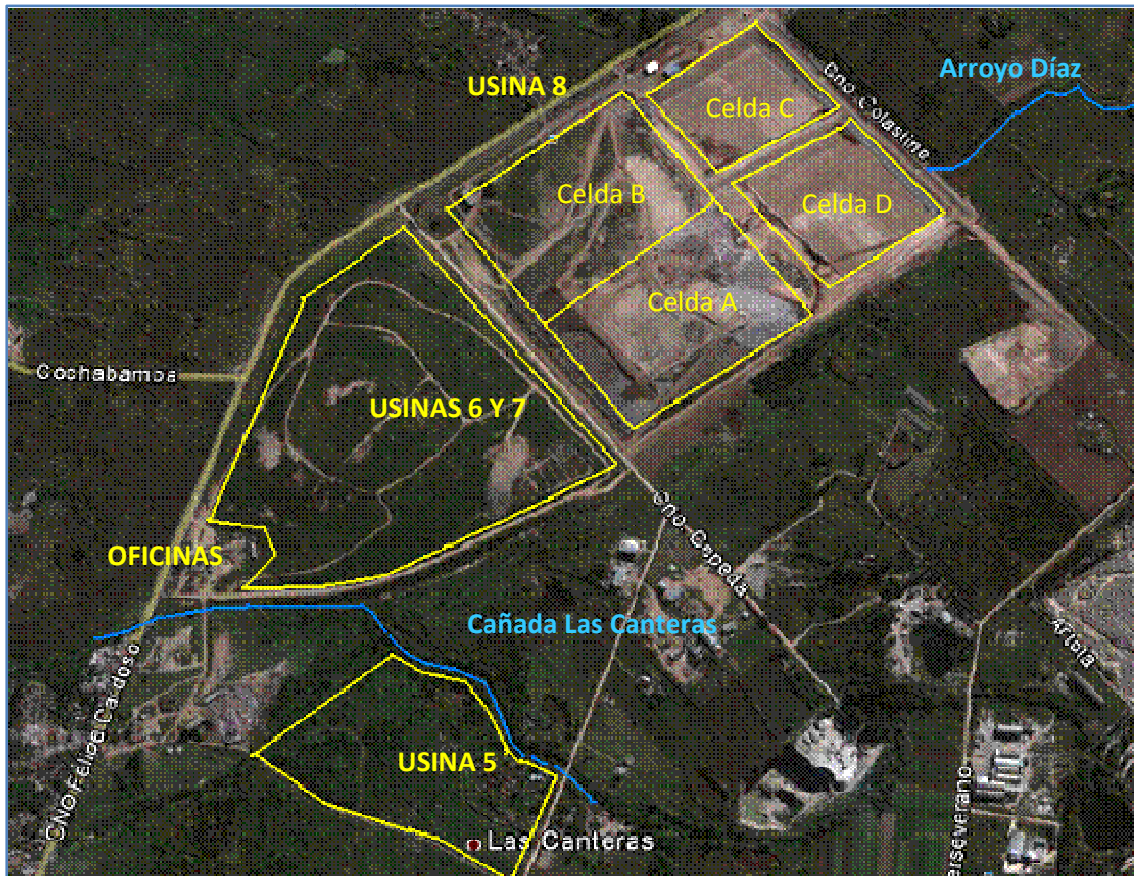


Imagen 1-1 Esquema de usinas del Vertedero de Felipe Cardoso

A continuación se presentan dos tomas fotográficas de las celdas C y D del Vertedero de Felipe Cardoso.



Fotografía 1-1 Vista de la celda C, usina 8



Fotografía 1-2 Relleno de celda D, usina 8

1.2 Lixiviados

El lixiviado puede ser definido como el líquido proveniente de la humedad natural del agua de constitución presente en la materia orgánica de los residuos sólidos, de los productos de degradación biológica de los materiales orgánicos y del agua de infiltración que penetra la cobertura y las celdas de residuos, sumado a los materiales disueltos o suspendidos que fueron extraídos de la masa de residuos.

Éstos son resultado de la interacción entre el proceso de biodegradación de la fracción orgánica de esos residuos y la infiltración de aguas pluviales que solubilizan componentes orgánicos e inorgánicos. En consecuencia, el factor más determinante en la generación de lixiviados de un Relleno Sanitario es el volumen de agua filtrada, en cuanto los factores determinantes de las características químicas y microbiológicas del lixiviado son las características de los residuos dispuestos (2).

En este contexto el lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material en el Relleno Sanitario.

El conocimiento de los orígenes, la generación y los tipos de residuos sólidos, así como los datos sobre la composición y las tasas de generación, son antecedentes básicos muy importantes en la toma de decisiones en lo que refiere a proyección y diseño de los sistemas de manejo y disposición final (3).

El principal objetivo de este informe es determinar el caudal aportado y los parámetros de caracterización del lixiviado, necesarios para el diseño y correcto funcionamiento de la Planta de Tratamiento.

A continuación se puede observar una fotografía donde se muestra el lixiviado siendo vertido al sistema de drenaje pluvial, antes de dirigirse al Arroyo Díaz (contribuyente al arroyo Carrasco).



Fotografía 1-3 Lixiviado y aguas pluviales dirigidas hacia Arroyo Díaz

1.3 Relleno Sanitario

Relleno Sanitario es una instalación ingenieril para la evacuación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el terreno, diseñada y operada de forma de minimizar los impactos sobre el medio ambiente y la salud pública, que confina los residuos en el menor volumen posible y los cubre con una capa de tierra al menos una vez al día. El Relleno Sanitario, aún bien operado, genera emisiones (biogás y lixiviado) que son producto de la acción microbiológica sobre la materia orgánica dispuesta en el Relleno. Para evitar daños al medio ambiente es necesario predecir, controlar y tratar estas emisiones. Para el diseño de los sistemas de recolección y tratamiento es necesario determinar la producción de las emisiones y su variabilidad en el tiempo (4).

1.4 Vertedero

A diferencia del Relleno Sanitario, un Vertedero es un sitio de disposición final de residuos en el cual no se tienen en cuenta todas, o ninguna de las consideraciones ambientales necesarias para minimizar impactos. Existen varios tipos de Vertederos, desde Vertederos incontrolados, a Vertederos controlados.

Nuestro caso de estudio se asemeja más a un Vertedero, que si bien cuenta con varias medidas de seguridad que lo diferencian de uno no controlado, no cuenta con todas las medidas necesarias para considerarse un Relleno Sanitario, por ejemplo por no disponer de tapada diaria o un control estricto de los residuos que ingresan. A pesar de esto se realiza una cobertura de arcilla luego de colmatada la capacidad de la celda, aislando los residuos del medio, al igual que en un Relleno Sanitario.

De ahora en más se hablará indistintamente de Relleno Sanitario y de Vertedero, sin perder de vista que nuestro caso de estudio no es estrictamente un Relleno Sanitario.

2 Cálculo de caudal de lixiviado

El cálculo del caudal de lixiviado a tratar resulta ser una componente muy compleja, pero fundamental estimarla correctamente en los proyectos de Plantas de Tratamiento de este tipo de efluentes.

Si bien existen algunos modelos y ejemplos, éstos están basados en un determinado funcionamiento del Relleno Sanitario, donde se dispone de una tapada y compactación diaria, y un estricto control de los residuos de ingreso al mismo.

De acuerdo con la observación realizada in situ y el diálogo mantenido con los operadores del sistema, este no es el caso del Vertedero Felipe Cardoso, ya que el mismo no recibe tapada diaria, ni mensual y tampoco es compactado a diario. El control de ingreso de residuos no es muy estricto por lo que luego se observan compuestos como Cromo en los lixiviados. Es por esto que llamamos Vertedero y no Relleno Sanitario al sitio de disposición final de residuos de Felipe Cardoso.

Por otro lado no se tienen datos precisos de aporte de residuos ni de características de los mismos. Tampoco se tiene ninguna información del material de cobertura utilizado, ni características como por ejemplo espesor de capa de cobertura.

A pesar de lo anteriormente dicho, se estudian métodos para la estimación de caudal que fueron diseñados para Rellenos Sanitarios, y no para Vertederos, intentando adaptar las variables de éstos de forma tal que el valor obtenido pueda considerarse una aproximación para nuestro caso de estudio.

2.1 Modelos de generación de lixiviados en Rellenos Sanitarios

Los modelos más difundidos disponibles son el HELP (Hydrology Evaluation Leachate Performance), desarrollado para la EPA, y el modelo de balance hidrológico de Relleno Sanitario de George Tchobanoglous, catedrático de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de California Davis.

Cabe señalar que ambos modelos tienen más incertidumbre de lo deseado, mas aún en nuestro caso puntual de aplicación donde no se dispone de bibliografía de lugares donde los Vertederos son operados como es el caso de Felipe Cardoso.

2.2 Modelo del HELP

2.2.1 Descripción del modelo

El programa HELP se ha desarrollado para proporcionar a los diseñadores de Rellenos Sanitarios una herramienta para la definición rápida y económica de alternativas de diseño. El programa puede ser usado para estimar las magnitudes de los diversos componentes del balance de agua, incluyendo el volumen de los lixiviados producidos y el espesor de suelo saturado de agua por encima de los revestimientos de geomembranas o barreras sólidas.

Los resultados pueden ser utilizados para comparar el potencial de producción de lixiviados de diseños alternativos, para seleccionar y dimensionar los sistemas de recolección de líquidos apropiado, y para dimensionar el tamaño de las instalaciones de tratamiento de lixiviados.

El programa utiliza el clima, el suelo y el diseño del Relleno como datos para generar estimaciones diarias de caudal. Para lograr este objetivo y calcular un balance de agua, la precipitación diaria se divide en almacenamiento en la superficie, almacenamiento de nieve en la superficie (en caso que esta exista), derretimiento de la nieve, interceptación, escorrentía, infiltración, evaporación de la superficie, evapotranspiración del suelo, almacenamiento de humedad del subsuelo, fugas de revestimiento (percolación), y drenaje lateral subsuperficial a los sistemas de colecta, eliminación y recirculación.

En la Figura 2-1 se presenta un esquema general de un perfil típico de Rellenos Sanitarios.

La capa inferior del suelo puede ser un material natural existente o traído de otro lugar, colocado y compactado en sitio. En cualquiera de los casos, la base del Relleno debe actuar como un revestimiento con una conductividad hidráulica (o permeabilidad) muy baja. Como un factor de seguridad adicional, una membrana sintética impermeable y una capa de arena pueden ser colocadas en la parte superior de la capa de "suelo barrera" para formar un revestimiento compuesto. Su función es recoger las fugas del revestimiento primario, donde se colectan los lixiviados producidos por las capas de residuos. Muy poco lixiviado debe percolar a través del revestimiento primario y prácticamente no debería haber filtración de lixiviados a través del revestimiento compuesto inferior hacia las formaciones naturales por debajo. El revestimiento primario consta inferiormente de una geomembrana y tuberías perforadas. Por encima de éstas se coloca una capa de arena de por lo menos 1m de espesor.

Cuando se alcanza la capacidad del relleno, la capa de residuo es cubierta por una tapada final, típicamente compuesta de cuatro capas distintas, como se muestra en la Figura 2-1. Su parte inferior es similar a la utilizada en la base del Relleno. Una capa de suelo adecuado para el crecimiento vegetativo se coloca en la parte superior del sistema de cubierta final para completar el Relleno Sanitario.

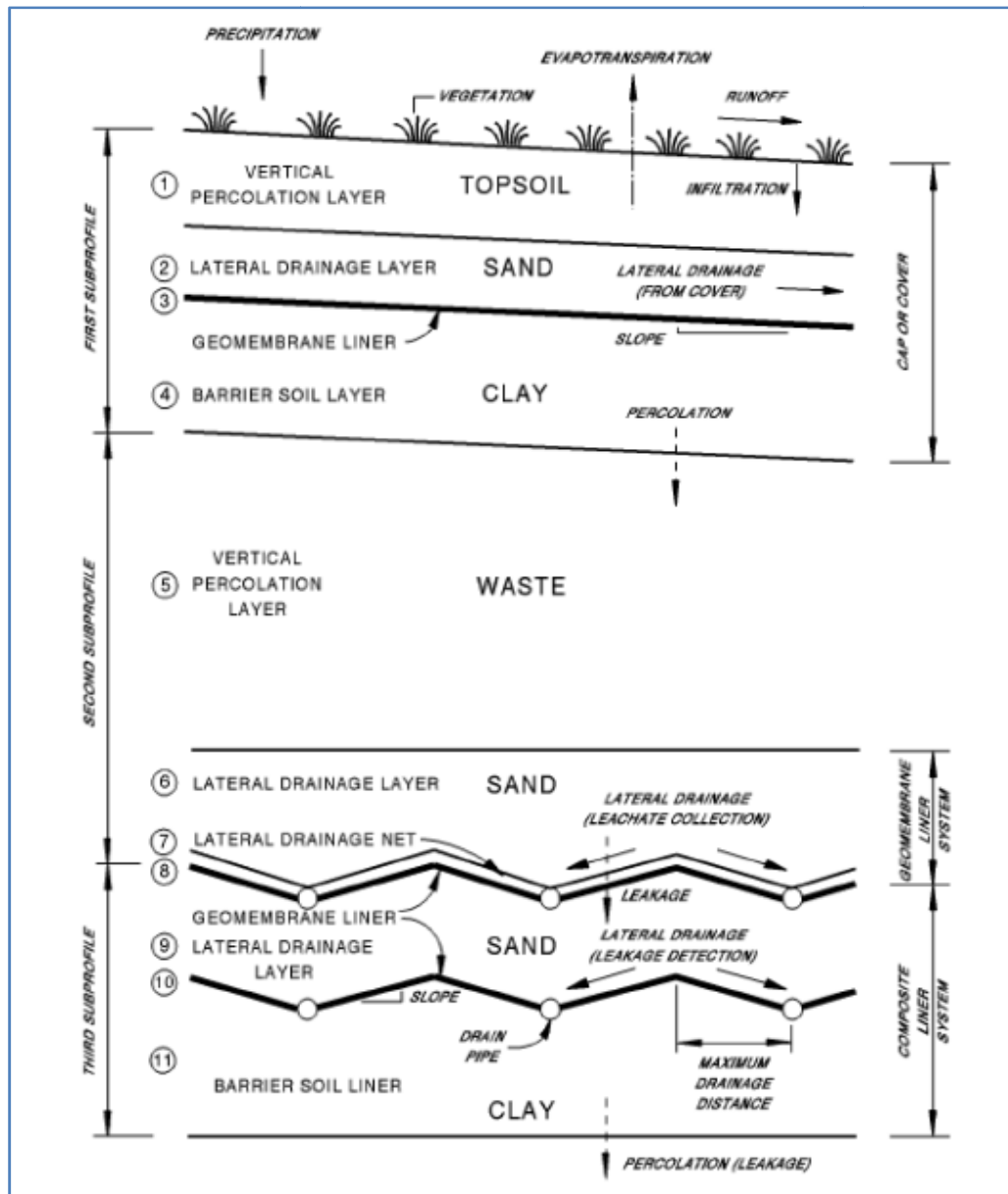


Figura 2-1 Esquema de un perfil típico de Relleno Sanitario

2.2.2 Parámetros de entrada

Datos meteorológicos

Evapotranspiración:

Profundidad de la zona de evaporación: Deberá ser al menos la profundidad media esperada de las raíces.

Se sugiere, según la condición esperada de vegetación los siguientes valores en cm:

Baja vegetación	Moderada	Excelente
25	55	101

Índice de área foliar: Es una magnitud adimensionada que relaciona el área total de un lado de las hojas con la superficie de suelo que ocupa la vegetación.

Sin vegetación	Pobre	Moderada	buena	Excelente
0,0	1,0	2,0	3,5	5,0

Días de inicio y fin de estación de crecimiento

Velocidad del viento media anual

Humedad relativa media por trimestre

Precipitación, Temperatura y Radiación Solar:

Las formas de introducir estas variables al programa son 3:

1. "Default" (Sólo para precipitación): Se puede seleccionar entre 102 ciudades de Estados Unidos en las cuales hay datos de precipitación diarios desde 1974 a 1978.
2. "Synthetic": El programa generará desde 1 a 100 años de datos diarios de Precipitación, Temperatura o Radiación Solar estocásticamente según la localización de Estados Unidos que se considere. Se podrá entrar en el programa los valores de Precipitación y Temperatura medias mensuales a modo de mejorar el proceso estocástico de generación de datos diarios.
3. "Create/Edit": Se puede editar datos diarios de Precipitación y Temperatura de una serie histórica de datos guardados o crear un archivo de datos diarios entre 1 y 100 años.

Datos de suelo

Información inicial:

Área del Relleno

Porcentaje del Relleno donde es posible el escurrimiento

Humedad inicial: Se puede introducir de 2 formas:

1. Introducir manualmente el contenido inicial de humedad de cada capa: Se necesita colocar la cantidad de agua o nieve sobre la superficie (mm).
2. Permitir que el programa inicialice el contenido de humedad en una condición cercana al estado estacionario.

Almacenamiento inicial de agua o nieve: Se introduce esta variable solo en el caso que se elija la opción 1 de *Humedad inicial*.

Información de las capas:

a) *Tipo de capa*: los tipos de capa del modelo HELP son 4:

1. Percolación vertical: Capas de residuo y de vegetación son ejemplos de percolación vertical. El flujo hacia abajo es modelado como un drenaje por gravedad no saturado. El flujo hacia arriba debido a la evapotranspiración es modelado como una extracción.
2. Drenaje lateral: El flujo vertical es modelado como en una capa de percolación vertical, sin embargo, es también permitido el drenaje lateral saturado. Para este tipo de capas es necesario además especificar:
 - Longitud máxima de drenaje: La proyección horizontal de la capa
 - Pendiente de drenaje: Entre 0 y 50%.
 - Porcentaje de recirculación del lixiviado recolectado: Entre 0 y 100%
 - Capa que recibe la recirculación del lixiviado
3. Barrera sólida: Su intención es restringir la percolación vertical. Tienen una conductividad hidráulica significativamente inferior a las demás capas. Solamente permite flujo vertical saturado. No permite evaporación ni flujo lateral.
4. Geomembrana: Son membranas sintéticas prácticamente impermeables, que reducen el área de drenaje vertical a una fracción muy pequeña de la zona situada cerca de defectos de fabricación y de instalación. También una pequeña cantidad de transporte de vapor se modela mediante la especificación de la difusividad de vapor de la geomembrana.

Cuando se coloca una geomembrana, se necesitan además los siguientes datos:

-Densidad de agujeros (Número de "pinhole"/ hectárea): Defectos de un diámetro igual o menor que el espesor de la membrana (estimado como 1 mm de diámetro). Geomembranas típicas pueden tienen 1 a 2 por hectárea.

-Densidad de defectos de instalación: Defectos de un diámetro mayor al espesor de la geomembrana. A continuación se presenta una tabla con rangos típicos:

Calidad de la instalación	Densidad de defectos (#/acre)
Excelente	Hasta 1
Buena	1 a 4
Media	4 a 10
Mala	10 a 20 (Rellenos viejos)

-Calidad de colocación: se refiere a la calidad del contacto entre la geomembrana y el suelo por debajo que limita la velocidad de drenaje. A continuación se explica los 6 casos considerados por el modelo HELP:

1. Perfecto: Asume perfecto, sin espacio.
2. Excelente: Asume contacto excepcional (por lo general sólo puede lograrse en el laboratorio).
3. Bueno: Asume buena instalación de campo con superficie lisa del suelo bien preparada y control del arrugamiento de la geomembrana.
4. Pobre: Asume una instalación con una superficie de suelo menos preparada.
5. El peor caso: Asume que la geomembrana no limita la velocidad de escurrimiento.
6. Geotextil separador: Asume la tasa de percolación está controlada por la transmisividad del geotextil que separa la geomembrana y la capa de suelo adyacente.

-Conductividad hidráulica saturada (difusividad de vapor): cm/s.

-Transmisividad del geotextil: cm^2/s (opcional)

b) Espesor de la capa: en metros

c) Textura del suelo:

- Porosidad (Vol. /Vol.)
- Capacidad de campo (Vol. /Vol.)
- Punto de Marchitez (Vol. /Vol.)
- Conductividad hidráulica saturada (cm/s): Es el caudal al cual el agua drena a través de una un suelo saturado bajo un gradiente de presión unitario.

Los valores se introducen manualmente o se eligen de la tabla siguiente, donde * significa que el suelo está compactado:

Classification			Total Porosity	Field Capacity	Wilting Point	Saturated Hydraulic Conductivity
HELP	USDA	USCS	vol/vol	vol/vol	vol/vol	cm/sec
1	CoS	SP	0.417	0.045	0.018	1.0x10 ⁻³
2	S	SW	0.437	0.062	0.024	5.8x10 ⁻³
3	FS	SW	0.457	0.083	0.033	3.1x10 ⁻³
4	LS	SM	0.437	0.105	0.047	1.7x10 ⁻³
5	LFS	SM	0.457	0.131	0.058	1.0x10 ⁻³
6	SL	SM	0.453	0.190	0.085	7.2x10 ⁻⁴
7	FSL	SM	0.473	0.222	0.104	5.2x10 ⁻⁴
8	L	ML	0.463	0.232	0.116	3.7x10 ⁻⁴
9	SiL	ML	0.501	0.284	0.135	1.9x10 ⁻⁴
10	SCL	SC	0.398	0.244	0.136	1.2x10 ⁻⁴
11	CL	CL	0.464	0.310	0.187	6.4x10 ⁻⁵
12	SiCL	CL	0.471	0.342	0.210	4.2x10 ⁻⁵
13	SC	SC	0.430	0.321	0.221	3.3x10 ⁻⁵
14	SiC	CH	0.479	0.371	0.251	2.5x10 ⁻⁵
15	C	CH	0.475	0.378	0.265	1.7x10 ⁻⁵
16	Barrier Soil		0.427	0.418	0.367	1.0x10 ⁻⁷
17	Bentonite Mat (0.6 cm)		0.750	0.747	0.400	3.0x10 ⁻⁹
18	Municipal Waste (900 lb/yd ³ or 312 kg/m ³)		0.671	0.292	0.077	1.0x10 ⁻³
19	Municipal Waste (channeling and dead zones)		0.168	0.073	0.019	1.0x10 ⁻³
20	Drainage Net (0.5 cm)		0.850	0.010	0.005	1.0x10 ⁻¹
21	Gravel		0.397	0.032	0.013	3.0x10 ⁻¹
22	L'	ML	0.419	0.307	0.180	1.9x10 ⁻⁵
23	SiL'	ML	0.461	0.360	0.203	9.0x10 ⁻⁶
24	SCL'	SC	0.365	0.305	0.202	2.7x10 ⁻⁶
25	CL'	CL	0.437	0.373	0.266	3.6x10 ⁻⁶
26	SiCL'	CL	0.445	0.393	0.277	1.9x10 ⁻⁶
27	SC'	SC	0.400	0.366	0.288	7.8x10 ⁻⁷
28	SiC'	CH	0.452	0.411	0.311	1.2x10 ⁻⁶
29	C'	CH	0.451	0.419	0.332	6.8x10 ⁻⁷
30	Coal-Burning Electric Plant Fly Ash'		0.541	0.187	0.047	5.0x10 ⁻⁵
31	Coal-Burning Electric Plant Bottom Ash'		0.578	0.076	0.025	4.1x10 ⁻³
32	Municipal Incinerator Fly Ash'		0.450	0.116	0.049	1.0x10 ⁻²
33	Fine Copper Slag'		0.375	0.055	0.020	4.1x10 ⁻²
34	Drainage Net (0.6 cm)		0.850	0.010	0.005	3.3x10 ⁻¹

Classification		Total Porosity	Field Capacity	Wilting Point	Saturated Hydraulic Conductivity
HELP	Geomembrane Material	vol/vol	vol/vol	vol/vol	cm/sec
35	High Density Polyethylene (HDPE)				2.0x10 ⁻¹³
36	Low Density Polyethylene (LDPE)				4.0x10 ⁻¹³
37	Polyvinyl Chloride (PVC)				2.0x10 ⁻¹¹
38	Butyl Rubber				1.0x10 ⁻¹²
39	Chlorinated Polyethylene (CPE)				4.0x10 ⁻¹²
40	Hypalon or Chlorosulfonated Polyethylene (CSPE)				3.0x10 ⁻¹²
41	Ethylene-Propylene Diene Monomer (EPDM)				2.0x10 ⁻¹³
42	Neoprene				3.0x10 ⁻¹²

Tabla 2-1 Propiedades de los suelos y geomembranas según su clasificación del modelo HELP

d) *Contenido de humedad inicial: (Vol. /Vol.)* (Se introduce solamente en caso que se haya elegido la introducción manual del contenido de humedad inicial)

e) Caudal de flujo subsuperficial entrante a la capa: (mm/año) (Opcional)

Datos del sitio

Es necesario especificar el Número de Curva del método SCS.

2.2.3 Valores considerados

La modelación se realiza hasta el año 2016, donde se supone será el fin de deposición de los residuos. Luego de este año el caudal comenzará a disminuir.

USINA 8, CELDAS C y D.

Datos meteorológicos:

- Datos necesarios para calcular la Evapotranspiración:
 - Profundidad zona de evaporación: 1 mm (profundidad mínima que se puede colocar en el programa, para quedar situados del lado de la seguridad)
 - Máximo índice de área foliar: 0 (correspondiente a no tener material de tapada)
 - Día de inicio de estación de crecimiento: 1
 - Día final de estación de crecimiento: 1 (igual al día de inicio de crecimiento debido a que no habrá material de tapada)
 - Velocidad de viento media: 21.6 km/h (equivalente a 6 m/s)
 - Humedad relativa primer trimestre (%): 75
 - Humedad relativa segundo trimestre (%): 75
 - Humedad relativa tercer trimestre (%): 75
 - Humedad relativa cuarto trimestre (%): 75
 - Latitud: -34.5 (El signo de menos indica hemisferio Sur)
- Precipitación y Temperatura: Se generó la precipitación diaria y temperatura artificialmente, utilizando coeficientes de Houston - Texas. Se observó que los datos mensuales de precipitación y temperatura de este estado son los más próximos a los valores de Uruguay. Se introdujeron los valores mensuales de estas variables correspondientes a la estación Las Brujas del INIA y a partir de estos el programa generó los valores diarios tal que su promedio mensual fuera el correspondiente al introducido.
- Radiación solar: También se utilizaron los coeficientes de Houston - Texas y la Latitud de Montevideo (34.5 Sur) para calcularla.

Datos de capas y del Vertedero

- Área del Relleno Sanitario: 16.5 Ha (Suma de las celdas C y D)
- Porcentaje de área donde el escurrimiento es posible: 100%

En la Figura 2-2 se presenta un esquema de la representación en HELP de las celdas C y D.

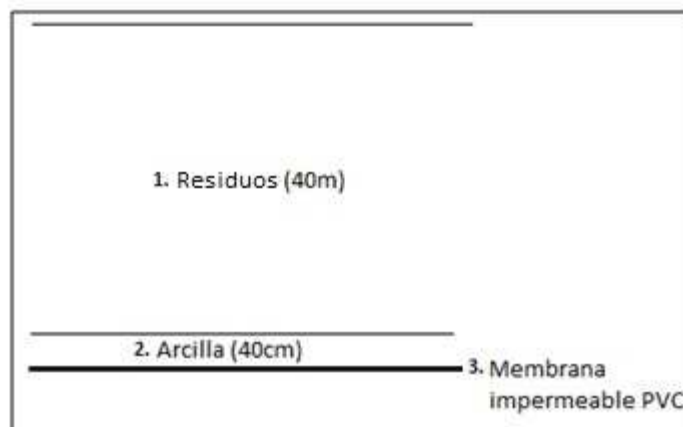


Figura 2-2 Esquema de representación en HELP celdas C y D de la Usina 8

No de capa	Tipo de capa	Espesor (cm)	No de textura	Porosidad total (Vol/Vol)	Capacidad de campo (Vol/Vol)	Punto de marchitez (Vol/Vol)	Humedad inicial (Vol/Vol)	Cond. Hidráulica de saturación (cm/s)
1	1: De percolación vertical	4000	18 (Municipal waste)	0.671	0.292	0.077	0.5	1.0×10^{-3}
2	3: Barrera de suelo	40	25 (CL*)	0.437	0.373	0.266	-	3.6×10^{-6}
3	4: Geomembrana	0.15	37 (PVC)	-	-	-	-	2.0×10^{-11}

Tabla 2-2 Propiedades de arcilla, residuos y geomembrana para las celdas C y D de la usina 8

➤ Datos de geomembrana:

Pinhole density (#/ha)	Defectos (#/ha)	Calidad de emplazamiento	Transmisividad del geotextil (cm ² /s)
1	5	3	-

- Número de Curva del SCS: 75
- N° de años de modelación: 5 (Período Junio 2011 - Junio 2016)

USINA 8, CELDAS A y B.

El período de modelación es el mismo que para las celdas C y D. Se modela estas celdas a partir del año en que se dejó de depositar sobre las mismas y se realizó una tapada, para luego comenzar a verter sobre las celdas C y D. En la Figura 2-3 se presenta un esquema de la modelación en HELP:

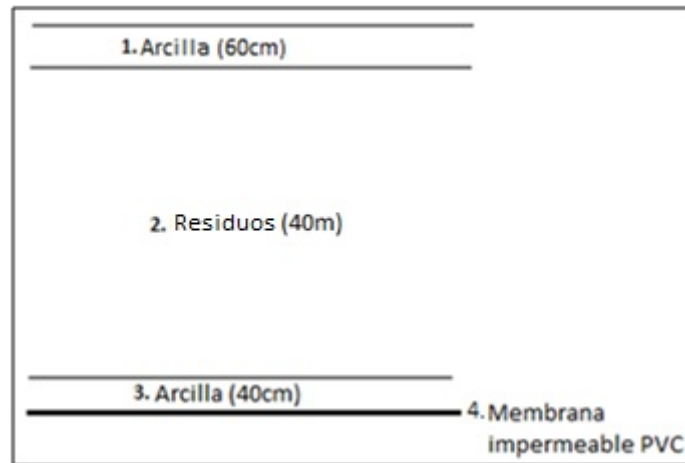


Figura 2-3 Esquema de representación en HELP celdas A y B de la Usina 8

Datos meteorológicos:

Los datos meteorológicos son los mismos que para las celdas C y D, excepto los siguientes:

- Máximo índice de área foliar: 3.5
- Profundidad zona evapotranspiración: 5 cm (Al menos la profundidad de las raíces)
- Día final de estación de crecimiento: 365

Datos de capas y del Vertedero

- Área del Relleno Sanitario: 19 Ha (Suma de las celdas A y B)

El tipo de arcilla, geomembrana y residuos son los mismos que los colocados para las celdas C y D.

USINAS 6 y 7

Se modeló para el período 2003-2016 (13 años), comenzando en el año que se deja de trabajar en estas usinas, agregándole una tapada de arcilla.

Datos meteorológicos:

Los datos meteorológicos son los mismos que para las celdas C y D de la Usina 8.

Datos de capas y del Vertedero

- Área del Relleno Sanitario: 29.5 Ha (Suma de las Usinas 6 y 7)

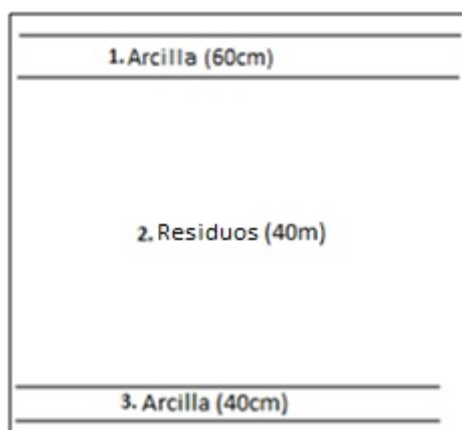
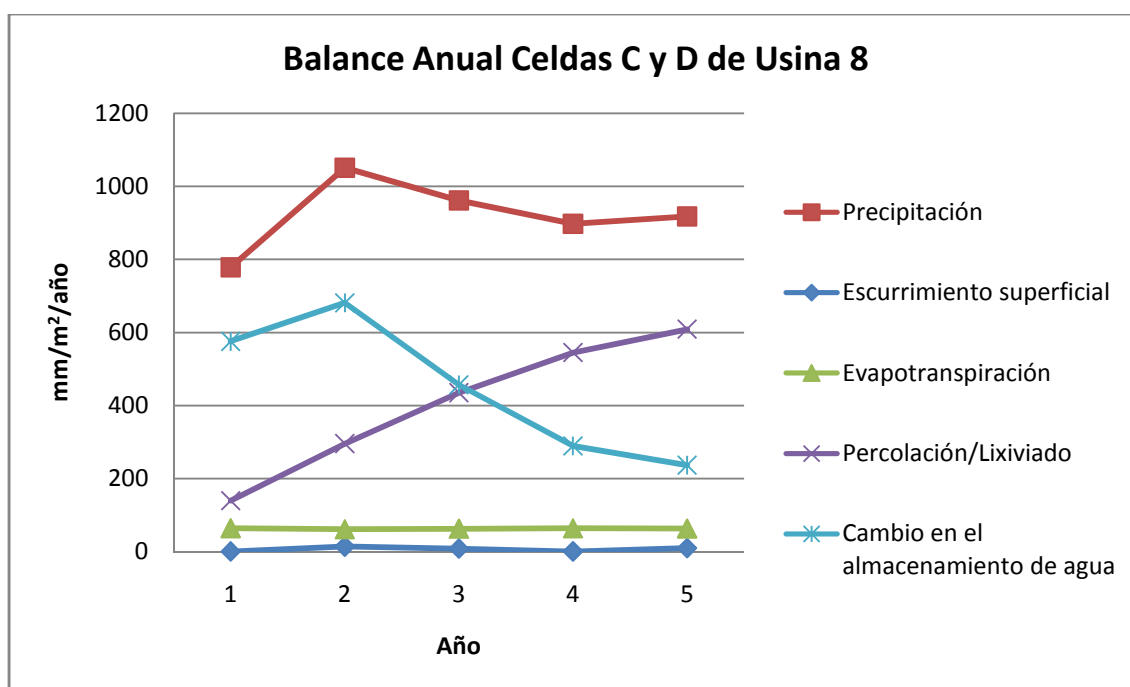


Figura 2-4 Esquema de representación en HELP de las Usinas 6 y 7

2.2.4 Análisis de resultados

USINA 8, CELDAS C y D.

A continuación se muestra gráficamente un balance anual para los 5 años de colocación de residuos sobre las celdas C y D:



Gráfica 2-1 Resultado Modelo HELP para celdas C y D de la Usina 8

Como ejemplo de cálculo de caudal promedio anual, se realizará éste para el año en el cual se obtiene mayor producción de lixiviados en las celdas C y D (año 2016).

La percolación (lixiviado) por unidad de área superficial (m²) de las celdas C y D para ese año resulta:

$$\text{Lixiviado} = 608\text{mm} = 0,608\text{m}$$

El área total de estas celdas es:

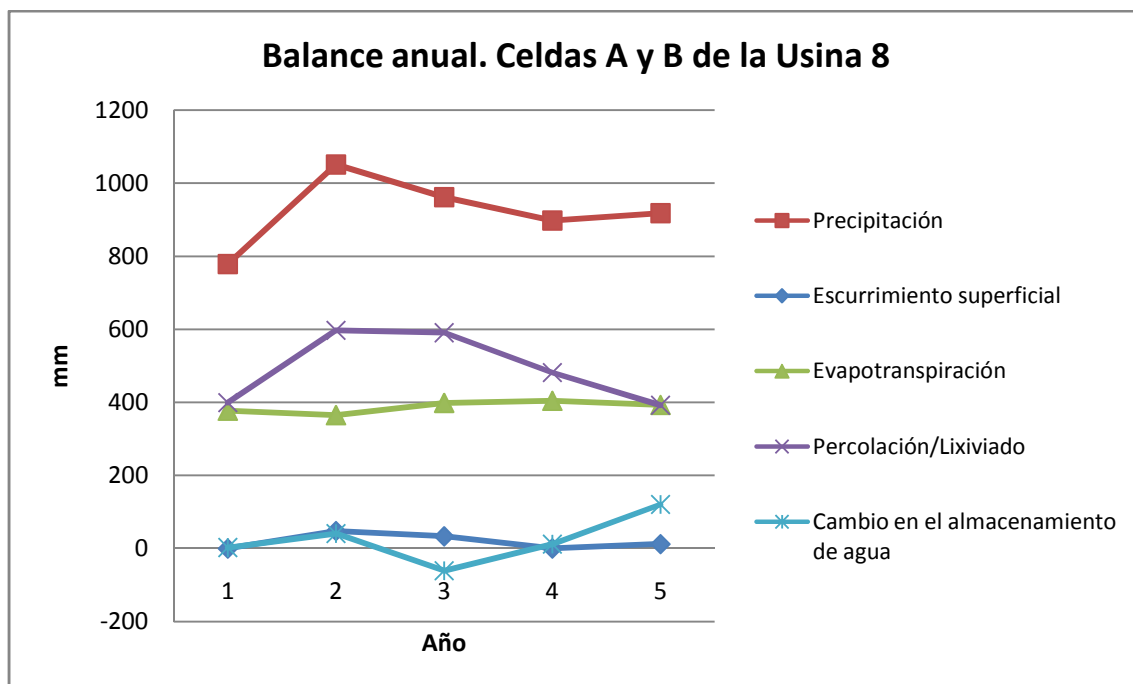
$$A_{CyD} = 16.5ha = 165000m^2$$

Por lo que el caudal para el año 2016 será:

$$Q_{CyD_2016} (m^3 / año) = 165000m^2 * 0.608m = 100320$$

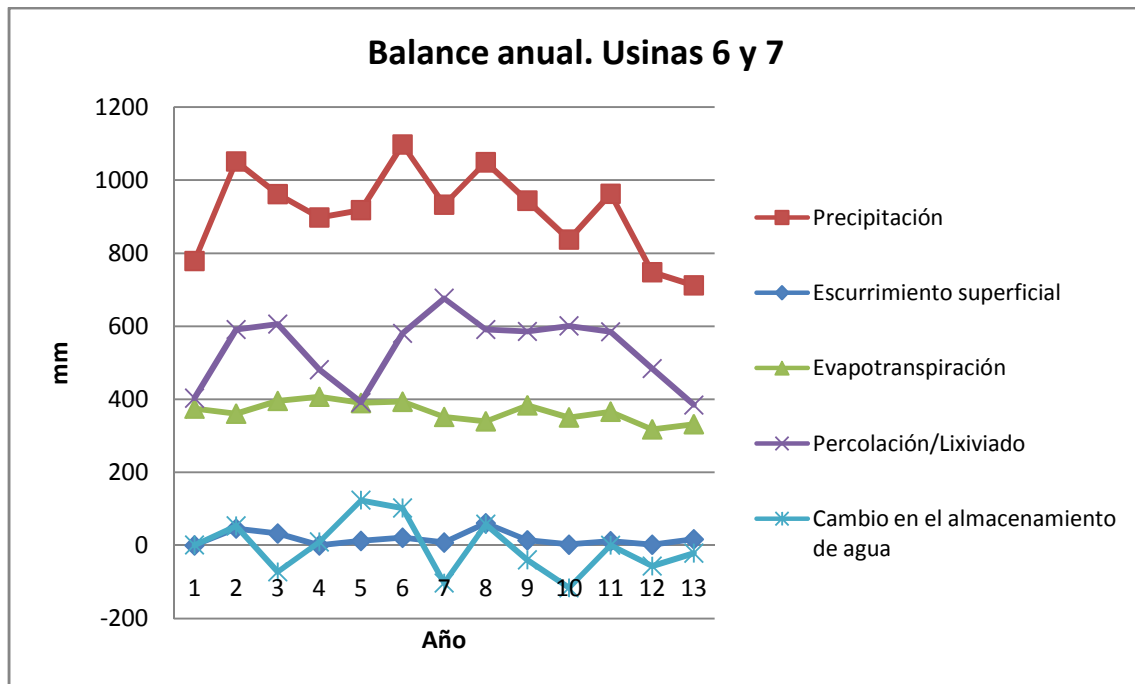
$$Q_{CyD_2016} (L/s) = \frac{100320 \times 1000}{365 \times 24 \times 60 \times 60} = 3.2$$

USINA 8, CELDAS A y B.



Gráfica 2-2 Modelo HELP para celdas A y B de la Usina 8

USINAS 6 y 7



Gráfica 2-3 Modelo HELP para usinas 6 y 7

En resumen los caudales obtenidos por el modelo para todo el Vertedero son los siguientes:

Año	Usina 8 celdas A y B	Usina 8 celdas C y D	Usinas 6 y 7	Caudal medio (L/s)
2013	3,6	1,5	5,6	10,8
2014	3,6	2,3	5,5	11,3
2015	2,9	2,8	4,5	10,3
2016	2,4	3,2	3,6	9,1

Tabla 2-3 Caudales obtenidos por el modelo HELP

2.3 Modelo del profesor Tchobanoglous

El potencial de formación de lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hidrológico del Vertedero. El balance hidrológico consiste en la suma de todas las cantidades de agua que entran en el Vertedero y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material en el Vertedero (3).

El siguiente esquema resume la idea del balance de aguas.

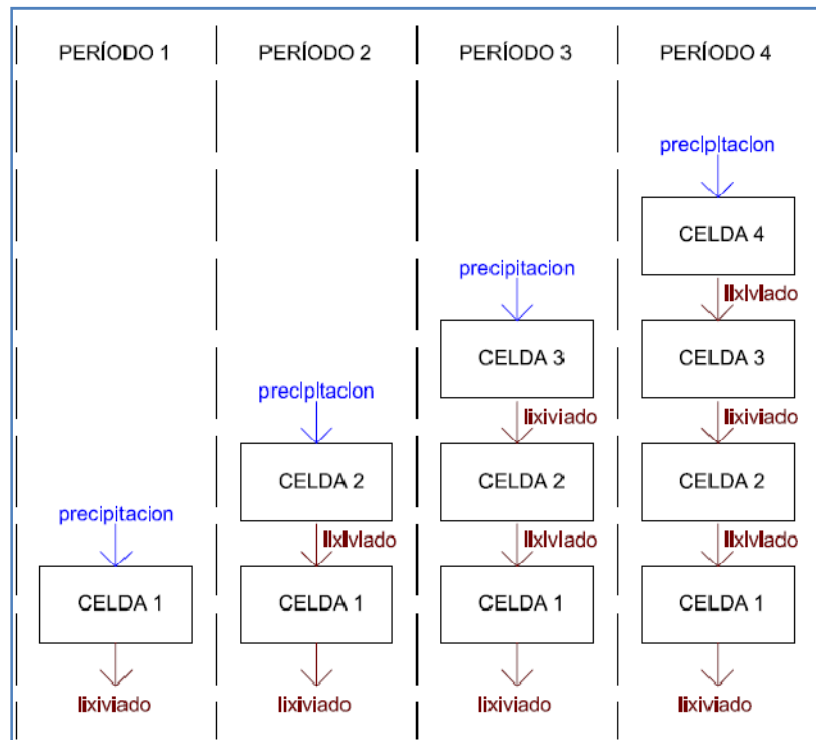


Figura 2-5 Esquema de modelo del profesor Tchobanoglous

2.3.1 Descripción de los componentes del modelo

En la siguiente figura se pueden observar los componentes que conforman el balance de aguas para una celda de Vertedero.

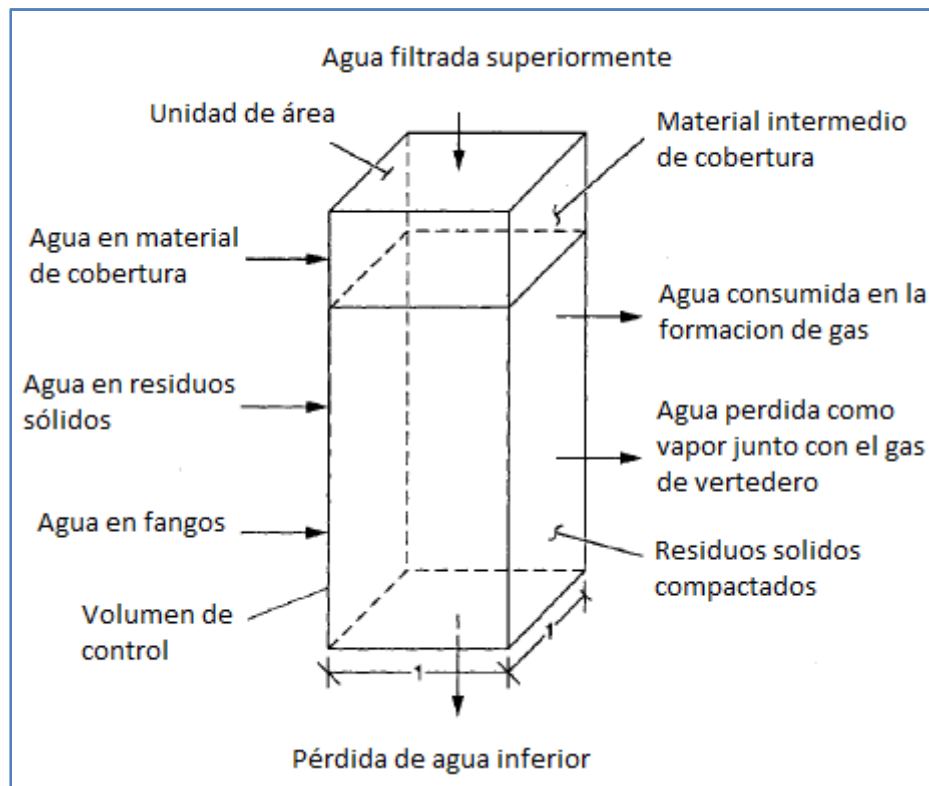


Figura 2-6 Esquema de balance de aguas para una celda de Vertedero

A continuación se describen las principales fuentes y sustracciones de agua.

- Agua filtrada superiormente: El agua que se filtra por la parte de arriba es la precipitación efectiva, si estamos hablando de la capa de Vertedero superior, o es el lixiviado de la capa superior a la capa en cuestión, cuando no estamos en el caso de la capa superior
- Agua aportada por los residuos: Es el agua contenida en los residuos al entrar al Vertedero, o sea, la humedad de éstos al llegar al sitio de disposición final.
- Agua aportada por el material de tapada: Es la cantidad de agua que entra con el material de tapada al Vertedero, y depende de la capacidad de campo (cantidad máxima de humedad que el material de tapada puede contener) del material de tapada.
- Agua perdida inferiormente: Esta agua puede ser el lixiviado, si se considera la celda inferior o inmediatamente por encima de un sistema intermedio de recogida de lixiviado, o puede ser el agua de aporte a la capa por debajo de ella, si se trata de una celda por encima de otra sin ningún sistema de recogida de lixiviado.
- Agua consumida en la formación del gas de Vertedero: Se consume agua durante la descomposición anaerobia de los constituyentes orgánicos de los RSU.
- Agua perdida como vapor de agua: La cantidad del vapor de agua que se escapa del Vertedero se determina suponiendo que el gas del Vertedero está saturado en vapor de agua y aplicando la ley de los gases perfectos.

- Capacidad de campo del Vertedero: Es la cantidad de agua que se puede retener, en contra de la gravedad.

2.3.1.1 Balance de aguas del Vertedero

A continuación se describe el balance de agua para el Vertedero.

$$\Delta S_{RS} = W_{RS} + W_{MC} + W_{A(u)} - W_{GV} - W_{VA} - W_E + W_{F(L)}$$

ΔS_{RS} = Variación en la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el Vertedero (kg/m³)

W_{RS} = Agua (humedad) en los residuos entrantes (kg/m³)

W_{MC} = Agua (humedad) en el material de cobertura (kg/m³)

$W_{A(u)}$ = Agua filtrada superiormente (kg/m³)

W_{GV} = Agua perdida en la formación de gas de Vertedero (kg/m³)

W_{VA} = Agua perdida como vapor de agua saturado con el gas de Vertedero (kg/m³)

W_E = Agua perdida debido a evaporación superficial (kg/m³)

$W_{F(L)}$ = Agua que sale inferiormente

Se realiza el balance hidrológico del Vertedero añadiendo la masa de agua entrante por unidad de área de una capa concreta del Vertedero, para un incremento de tiempo dado, al contenido de humedad de esa capa al final del incremento del tiempo anterior, y sustrayendo la masa de agua perdida de la capa durante el período de tiempo actual. Este resultado nos da información de cuanta agua disponible hay para una capa en un período de tiempo dado. Si este valor está por debajo de la capacidad de campo del Vertedero, ésta será retenida por el mismo, por lo que no se formará lixiviado. Por otra parte, si el valor del agua disponible es mayor que la capacidad de campo del Vertedero, se producirá lixiviado, en una cantidad igual al valor del agua disponible sustrayéndole la capacidad de campo del Vertedero (cantidad de agua que éste puede retener en contra de la gravedad) (3).

2.3.2 Parámetros de entrada utilizados para el modelo

En las siguientes tablas se pueden ver los parámetros de entrada utilizados para la aplicación del modelo.

H inicial (%)	50
Densidad residuos (kg/m ³)	700
Densidad suelo tapada (kg/m ³)	1770
Fracción capa correspondiente a tapada	0,08
Lluvia efectiva anual 12 meses (cm)	109,8
Porcentaje lluvia efectiva luego de tapada (%)	25

Tabla 2-4 Parámetros de entrada utilizados para el modelo del profesor Tchobanoglous

Producción de gas (m ³ /kg)	
Final del año	Total
1	0,000
2	0,059
3	0,104
4	0,075
5	0,047
6	0,019
7	0,005
8	0,004
9	0,004
10	0,003
11	0,002
12	0,002
13	0,001
14	0,001
15	0,001
16	0,001
17	0,000
Total	0,328

Tabla 2-5 Parámetros de entrada utilizados para el modelo del profesor Tchobanoglous

Agua consumida en formación de gas	0,16	(kg/m ³)
Agua como vapor en el gas	0,016	(kg/m ³)
Densidad gas	1,339	(kg/m ³)

Tabla 2-6 Parámetros de entrada utilizados para el modelo del profesor Tchobanoglous

2.3.2.1 Humedad inicial de los residuos

El Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana (PDRS) trabaja con valores comprendidos entre 23% y 55% de humedad en los residuos sólidos que ingresan al Vertedero.

Otros trabajos(5), realizaron ensayos sobre residuos sólidos en la ciudad de Montevideo (a finales de Octubre 2011) y registraron valores que oscilan en el 50%, con un promedio de 51,5%.

En nuestro caso se consideró una humedad del 50% por considerar que es el valor que mejor representa los residuos domésticos de la ciudad de Montevideo.

2.3.2.2 Densidad del suelo de tapada

Este valor fue tomado de bibliografía(3). Si bien en la realidad este parámetro no es nada constante, se entiende según estudio de sensibilidad que se verá luego, que no es un parámetro decisorio a la hora de calcular el caudal máximo de generación de lixiviado.

2.3.2.3 Fracción correspondiente a tapada

La fracción correspondiente a tapada fue un valor estimado basado en la información recibida del Ing. Federico Charbonnier, encargado de la operación del Vertedero Felipe Cardoso hasta el año 2012.

2.3.2.4 Precipitación efectiva

La precipitación efectiva es la precipitación que penetra la capa superior de residuos para ingresar al interior del Relleno Sanitario. Este es un parámetro muy complejo de estimar y no existe bibliografía ni ejemplo alguno para un Vertedero sin ningún tipo de tapada diaria.

La bibliografía consultada habla de un balance de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento para determinar la precipitación efectiva. La evapotranspiración puede ser despreciada según bibliografía (6), quedando del lado de la seguridad ya que este parámetro es muy variable pudiendo llegar a subestimaciones en el caudal de lixiviado. El escurrimiento superficial mientras el Vertedero está en funcionamiento (sin cobertura final) también puede ser despreciado ya que debido a las características que tienen los residuos sólidos sin tapada en su superficie, el escurrimiento se verá impedido.

Por lo tanto se considera que la precipitación efectiva anual es equivalente a la precipitación media anual en el Uruguay, fijando un valor de 109,8cm.

2.3.2.5 Precipitación efectiva luego de cierre de celda (Porcentaje lluvia efectiva luego de tapada final)

Según bibliografía (6) la precipitación efectiva luego del cierre de celda puede estimarse en un 10%.

2.3.2.6 Producción de gas

Como se verá a continuación en el análisis de sensibilidad, la producción de gas no afecta de forma perceptible a la producción de lixiviados, por lo que se utilizarán los datos de la producción del ejemplo del libro donde se presenta el modelo(3).

2.3.2.7 Capacidad de campo de los residuos

No existe bibliografía aplicable a este estudio que indique valores a considerar de la capacidad de campo de los residuos, por lo que se opta por trabajar con la fórmula de capacidad de campo disponible en bibliografía(3), con la siguiente expresión:

$$CC=0,6-0,55*[W/(W+4536)]$$

Donde:

W= peso de sobrecarga en la mitad de la altura de la capa en estudio.

2.3.2.8 Características generales del Vertedero

Para la modelación del Vertedero es necesario conocer altura de capas y áreas ocupadas por éstas.

El modelo planteado por el libro del profesor Tchobanoglous utiliza como uno de los parámetros de entrada la precipitación efectiva anual. Este parámetro es útil para el modelo ya que el mismo considera que cada capa es dispuesta en 12 meses.

En nuestro caso las capas a considerar tienen tiempos de operación variables. La duración de llenado de capas varía desde 4 meses a 14 meses, por lo que para poder aplicar el modelo se realizó la suposición de que en ese período la precipitación efectiva total era una fracción de la precipitación efectiva anual obtenida con una regla de tres.

A continuación se presenta un esquema con la disposición de capas en las celdas C y D de la Usina 8.

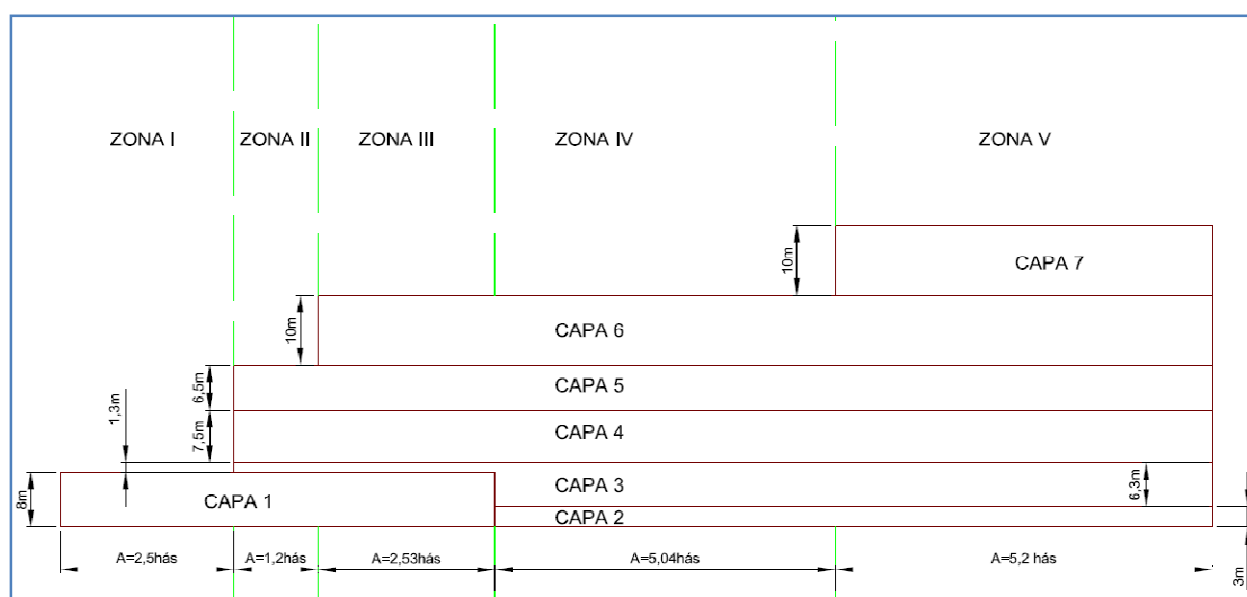


Figura 2-7 Esquema de disposición de residuos celdas C y D

Según datos aportados por el Ing. Federico Charbonnier (responsable de la operación del Vertedero hasta el año 2012) y considerando que el funcionamiento de la celda C comenzó en Mayo 2011, el Vertedero se opera de la siguiente manera.

Período 1 (Últimos 7 meses del 2011): Se rellenan 8 m de altura promedio sobre las 6,23 hectáreas de la celda C.

Período 2 (Primeros 4 meses del 2012): Se rellenan 3 m de altura promedio sobre las 10,27 hectáreas de la celda D.

Período 3 (Últimos 8 meses del 2012): Se rellenan 5 m de altura promedio sobre 14 hectáreas sobre de las celdas C y D. Por estar las celdas C y D a diferentes alturas, se considera que los primeros residuos van hacia la celda D hasta igualar la altura con la celda C, y luego sobre 14 has se completa la altura necesaria para satisfacer el volumen de residuos existentes en 5 m de altura sobre 14 hectáreas.

Período 4 (Año 2013): Se dispone el residuo sólido sobre 14 hectáreas sobre de las celdas C y D hasta completar una altura promedio de 7,5 m.

Período 5(Primeros 10 meses del 2014): Se dispone el residuo sólido sobre 14 hectáreas sobre de las celdas C y D hasta completar una altura promedio de 6,5 m.

Período 6(Últimos 2 meses del 2014 y año 2015 completo): Se rellenan 10 m de altura promedio sobre 12,8 hectáreas encima de las celdas C y D.

Período 7(Primeros 6 meses del 2016): Se rellenan 10 m de altura sobre las celdas C y D.

Si bien durante los períodos 6 y 7 la disposición será realizada sobre las celdas A, B, C y D, a los efectos del cálculo de caudal se puede realizar la suposición que estos residuos serán depositados sobre celdas C y D.

Los períodos 8 y posteriores son considerados de duración igual a 12 meses, sin disposición de residuo alguno.

Cabe destacar que solo se estudian las celdas C y D por ser las celdas en uso. Por estar las celdas A y B ya clausuradas el lixiviado en ellas generado es equivalente a la precipitación que efectivamente infiltre luego de cubierto el material, por lo que estimado este parámetro no es necesario modelar las celdas A y B.

A continuación se presenta un resumen de los vertidos.

Hasta 1990	Período 1990 a 05/2002	Período 05/2002 a 05/2011
Vertido sobre la Usina 5 , finalizando con cobertura de arcilla consolidada. En el presente (2013) se encuentra con vegetación	Vertido sobre las Usinas 6 y 7 , finalizando con cobertura de arcilla consolidada y cubierta en el presente con vegetación	Vertido sobre celdas A y B de la Usina 8 , finalizando con cobertura parcial
Á = 22.7 ha	Á total = 29.5 ha	H (A)=16 m ; H (B)=21 m Ábase (A)= 8.75 ha Ábase (B)= 9.97 ha Ásuperior (A)= 2.6 ha Ásuperior (B)= 2.3 ha V(A)=859717m3 V(B)=909794m3

2011												2012												2013												2014												2015												2016					
6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6					
Período 1						Período 2						Período 3						Período 4						Período 5						Período 6						Período 7																													
Comienzo vertido sobre celda C de la Usina 8.						Comienzo vertido sobre celda D de la Usina 8.						Celdas C y D						Celdas C y D						Celdas C y D						Celdas A, B, C y D						Celdas A, B, C y D																													
H = 8m Á = 6.23 ha V = 498400 m3						H = 3m Á = 10.27 ha V = 308100 m3						H = 5m Á = 14 ha V = 700000 m3						H = 7.5 m Á = 14 ha V = 1050000 m3						H = 6.5m Á = 14 ha V = 910000 m3						H = 10m Á = 12.8 ha V = 1280000 m3						H = 10m Á = 5.2 ha V = 520000 m3																													

2.3.3 Hipótesis consideradas

Para aplicar el modelo al cálculo de caudal fueron consideradas varias hipótesis. Algunas son muy fuertes e ingresan una incertidumbre considerable al cálculo. A continuación se listan las hipótesis consideradas.

- Las fuentes de ingreso de agua al Vertedero provienen de la precipitación y la humedad inicial de los residuos
- Toda la escorrentía de zonas adyacentes es recolectada y conducida de manera que no ingresa a la zona de Vertedero activa.
- No se considera intrusión de agua subterránea a través de paredes laterales o el fondo del Vertedero
- Todo el movimiento de agua a través del Vertedero es vertical
- No se considera evapotranspiración ni evaporación
- No se realiza cobertura alguna hasta clausurada la celda, cuando se colocará una cobertura de material poco permeable.

2.3.4 Resultados obtenidos

El modelo es un balance anual, por lo que los resultados obtenidos son caudales medios basados en un volumen anual de generación de lixiviados.

2.3.4.1 Parámetros utilizados (celdas C y D)

A continuación se detallan los parámetros utilizados y los resultados obtenidos.

H inicial (%)	50
Densidad residuos (kg/m ³)	780
Densidad suelo tapada (kg/m ³)	1770
Fracción capa correspondiente a tapada	0,08
Lluvia efectiva anual 12 meses (cm)	100
Porcentaje lluvia efectiva luego de tapada (%)	10

Tabla 2-7 Parámetros utilizados para el modelo del Tchobanoglous

Zona	A (ha)
1	2,50
2	1,20
3	2,53
4	5,07
5	5,20

Tabla 2-8 Áreas de zonas pertenecientes a celdas C y D

Capa	Altura zona I a III (m)	Altura zona III a V (m)
1	8,0	
2	3,0	
3	1,3	6,3
4	7,5	
5	6,5	
6	10,0	
7	10,0	

Tabla 2-9 Altura de las capas consideradas

Estos valores son representados esquemáticamente en la Figura 2-7 Esquema de disposición de residuos celdas C y D

2.3.4.2 Resultados celdas C y D de Usina 8

Para las celdas C y D se tienen los siguientes caudales obtenidos con el modelo del Tchobanoglous.

	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7	Período 8	Período 9
Meses en el año	7	4	8	12	10	14	6	12	12
Q(l/s) zona 1	3,41	0,00	0,07	0,12	0,09	0,11	0,04	0,09	0,00
Q(l/s) zona 2	1,64	0,00	0,62	1,22	1,24	0,00	0,09	0,06	0,00
Q(l/s) zona 3	3,45	0,00	1,30	2,58	2,62	2,98	0,00	0,00	0,00
Q(l/s) zona 4		4,53	5,62	5,14	5,30	5,98	0,00	0,00	0,21
Q(l/s) zona 5		4,64	5,76	5,27	5,44	6,13	11,59	0,00	0,09
Q suma(l/s) celdas C y D	8,50	9,17	13,36	14,34	14,69	15,20	11,73	0,15	0,30
Q suma total verterdero(l/s)	10,18	10,85	15,04	16,01	16,37	16,88	13,41	1,83	1,98

Tabla 2-10 Caudales por zona obtenidos para las celdas C y D según el modelo de Tchobanoglous

Como se puede apreciar en la tabla el caudal máximo medio obtenido para las celdas C y D se da en el período 6, y tiene un valor de **15,20 l/s**.

Este valor corresponde al caudal de lixiviado de las celdas C y D. A este valor hay que sumarle el lixiviado proveniente de las celdas A y B de la usina 8, y el lixiviado de las usinas 6 y 7.

Por estar las celdas clausuradas se estima según bibliografía (3) que el caudal de lixiviados es equivalente a la precipitación efectiva luego de la cobertura final, que como se mencionó anteriormente se aproxima por el 10% de la precipitación media anual (109,8cm).

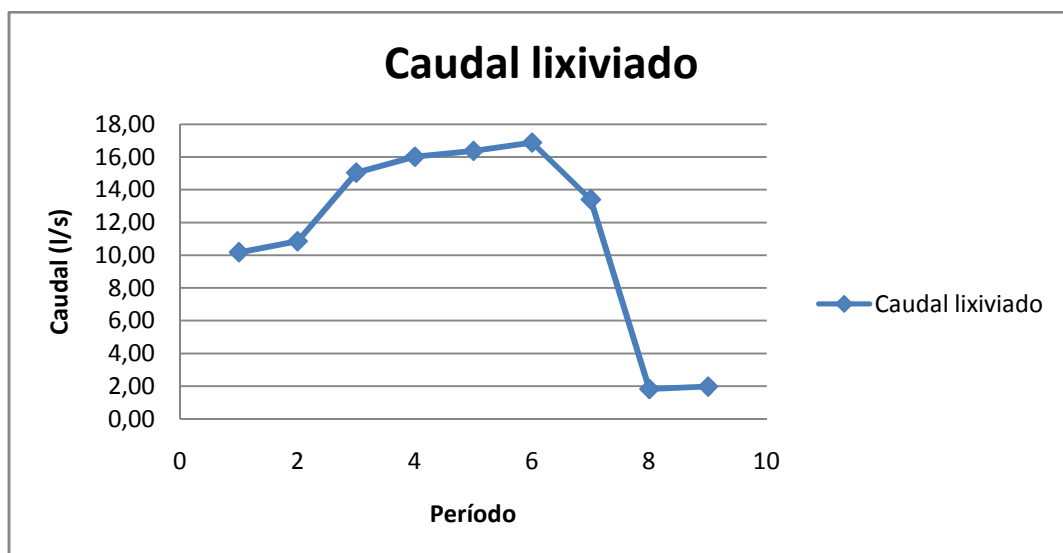
En las planillas a continuación se muestran los resultados finales del cálculo.

	A (has)
Usinas 6 y 7	29,50
Celda A	8,75
Celda B	9,97

Tabla 2-11 Áreas de usinas 6, 7 y usina 8 celdas A y B

Q usina 8 celdas C y D (l/s)	15,20
Q usina 8 celdas A y B (l/s)	0,65
Q usina 5 (l/s)	0,00
Q usinas 6 y 7 (l/s)	1,03
Q total (l/s)	16,88

Tabla 2-12 Resumen de resultado de caudales obtenidos por el modelo del Tchobanoglous



Gráfica 2-4 Caudales obtenidos por el modelo del Tchobanoglous para el vertedero completo

Como se puede observar en el gráfico anterior el caudal máximo se da para el período 6. Luego de este período existe solo una etapa de relleno (período 7), y luego el Vertedero es clausurado.

En la clausura se tiene una caída pico de caudal debido a que se utiliza la hipótesis que luego de clausurado el Vertedero será apropiadamente cubierto de material arcilloso, y una capa de material apto para el crecimiento de vegetación variada.

Cabe destacar que los resultados de este modelo provienen del cálculo de un caudal medio a partir de un volumen anual de lixiviados, por lo que los picos diarios o durante el año no son considerados en este modelo.

2.3.4.3 Análisis de sensibilidad de parámetros

Con el fin de determinar la sensibilidad del modelo frente a las variaciones de parámetros y poder determinar que parámetros eran claves se realizó un análisis de sensibilidad del caudal máximo.

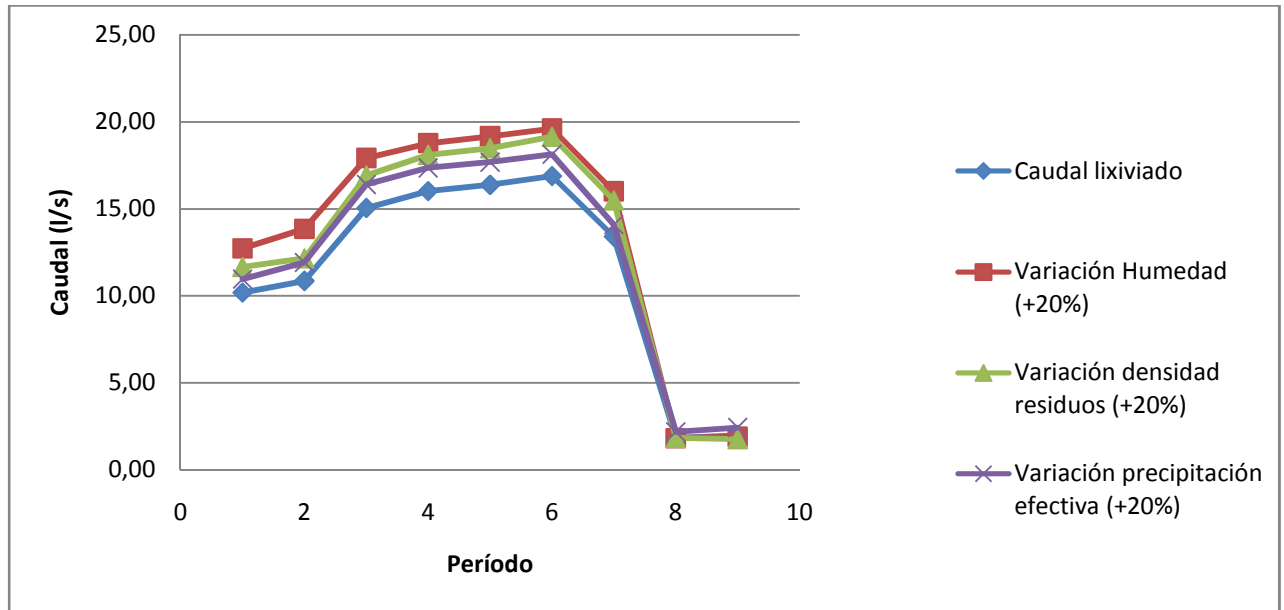
A continuación se puede observar una planilla que representa el porcentaje de variación del caudal total frente a variaciones en los parámetros.

Parámetro a variar	%Variación parámetro	Qmax (l/s)	%Variación caudal
H inicial (%)	20	19,6	16,2
Densidad residuos (kg/m ³)	20	19,1	13,4
Densidad suelo tapada (kg/m ³)	20	16,9	0,3
Fracción capa correspondiente a tapada	20	16,7	-0,9
Lluvia efectiva anual 12 meses (cm)	20	18,1	7,4
Porcentaje lluvia efectiva luego de tapada (%)	20	17,2	2,2
Producción de gas	Producción a cero	16,9	0,3

Tabla 2-13 Análisis de sensibilidad de parámetros

Como se puede observar en la planilla, los parámetros con mayor incidencia en el cálculo de caudal son la humedad inicial del residuo, la densidad de los residuos y la lluvia efectiva anual durante la operación del Vertedero (sin cobertura).

En la siguiente gráfica se puede observar la sensibilidad del caudal frente a variaciones de los parámetros más incidentes vistos en la tabla anterior.



Gráfica 2-5 Análisis de sensibilidad de parámetros

2.4 Análisis de los datos obtenidos en campo

Para el diseño de la Planta de tratamiento de los lixiviados del Vertedero de Montevideo, la empresa ESPINA realizó mediciones de caudal en 2 puntos de generación de lixiviados. También se colocó un pluviómetro para poder correlacionar los datos de caudal con los de precipitación.

A continuación, a partir de la información obtenida se analizan los datos, estudiando el comportamiento del lixiviado que se genera y un caudal proyectado para el fin de operación del Vertedero.

2.4.1 Situación del Vertedero al momento de las mediciones

Al momento de las mediciones, las celdas A y B se encontraban llenas y con una mínima cobertura arcillosa.

La celda D se encontraba vacía y la C estaba siendo rellenada. Sobre el final de la medición la celda C contaba con aproximadamente 8 m de altura.

Las celdas C y D tienen una membrana de geotextil cubierta con una capa arcillosa de 40 cm. Para la recolección del lixiviado generado cuentan con drenes longitudinales de roca, debajo de los cuales se colocó una tubería perforada que desagota en la cámara 2.

Esta tubería colecta además de los lixiviados de C y D y lo que escurre por los taludes de A y B que orientan hacia las celdas anteriores.

Los taludes exteriores de A y B escurren hacia las cunetas de recolección de pluviales de la zona, y por eso se detectaron lixiviados en la cámara 1.

En la siguiente figura se puede observar la ubicación de las cámaras antes mencionadas.



Figura 2-8 Cámaras de aforo y muestreo utilizadas por Espina

2.4.2 Proceso de toma de mediciones

2.4.2.1 Período de medición

Los datos recolectados abarcan el período desde el 24/11/2011 al 08/01/2012.

El pluviómetro se colocó el día 12/12/2011.

2.4.2.2 Instrumentación

Para medir caudal se utilizaron dos vertederos triangulares (uno en cada cámara) de ángulo recto de 30 cm de altura.

La ley de descarga de un vertedero triangular de ángulo recto es $Q(m^3/s) = 1.4 \times h^{5/2}$, siendo $h(m)$ la altura de agua sobre el vertedero. Con esto resulta que el caudal máximo posible a medir en este vertedero es $Q = 1.4 \times 0.3^{5/2} = 0.069 m^3/s = 69 L/s$.

Para determinar el nivel se colocaron sensores que almacenaban datos cada 1 minuto.

El vertedero en la cámara 1 se instaló de la siguiente manera:

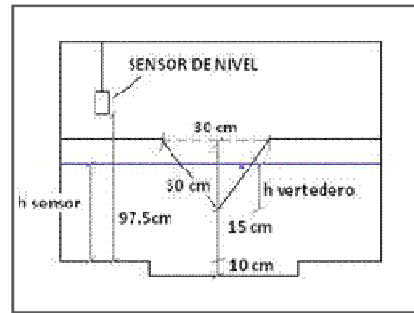


Figura 2-9 Esquema de vertedero instalado en Cámara 1

El de la cámara 2:

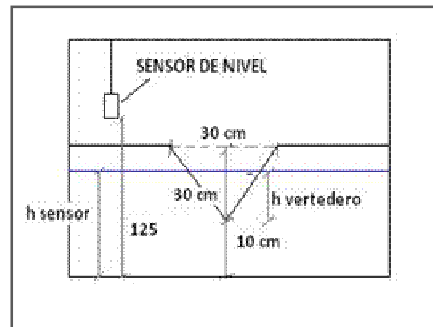


Figura 2-10 Esquema de vertedero instalado en Cámara 2

Por lo que la altura sobre el vertedero en función del nivel medido por el sensor se calcula como:

En cámara 1: $h \text{ vertedero} = h \text{ sensor} - 15\text{cm}$

En cámara 2: $h \text{ vertedero} = h \text{ sensor} - 10\text{cm}$

Los datos del pluviómetro eran registrados cada 1 minuto.

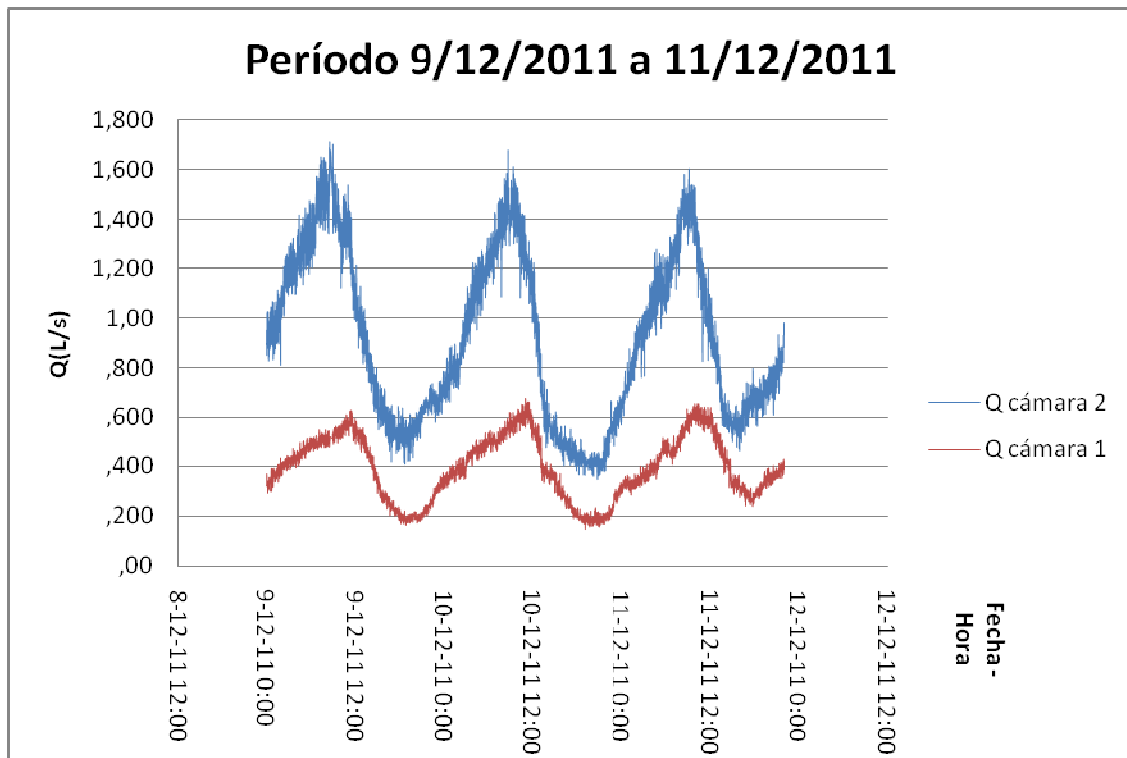
2.4.3 Análisis de los datos

A continuación se analizarán los datos diferenciándolos por su comportamiento en tiempo seco y en tiempo lluvioso.

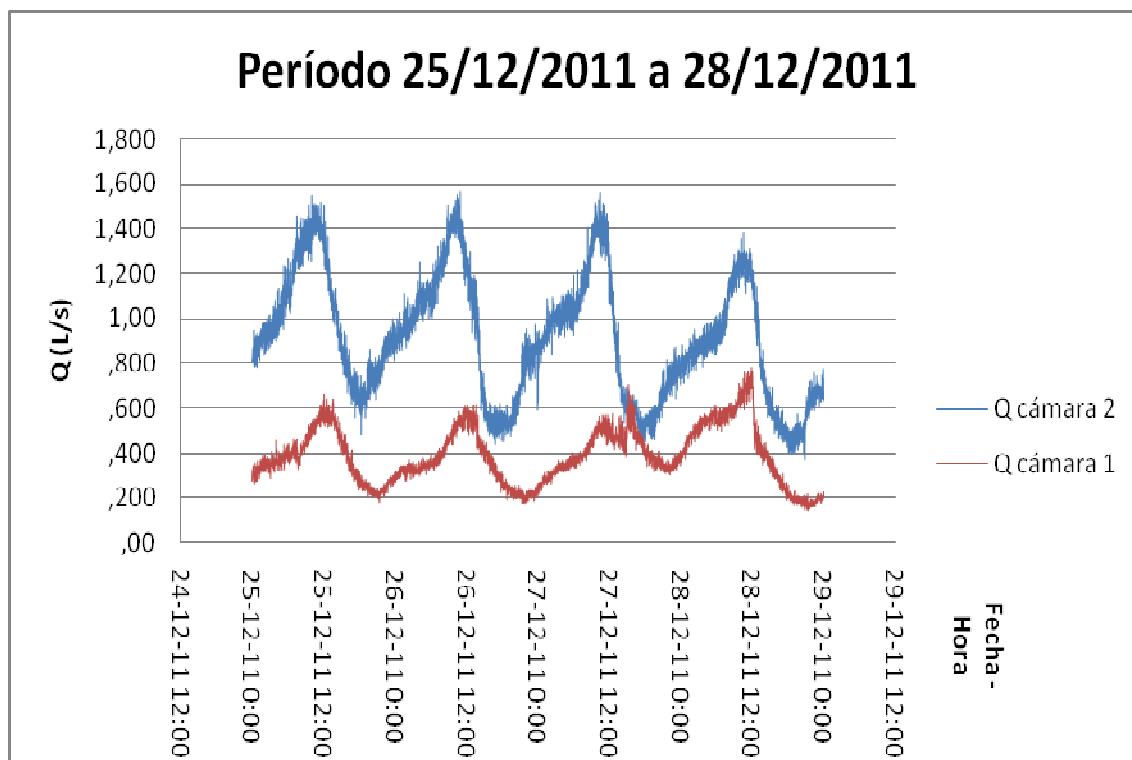
2.4.3.1 Análisis de períodos de tiempo seco

Se estudiaron los períodos de tiempo seco considerando algunos días de distanciamiento de la lluvia.

Para ello se graficaron los valores de caudal obtenidos en ambas cámaras a partir de los niveles registrados. Se observa un comportamiento muy similar en los lixiviados colectados en éstas, y este comportamiento se repite diariamente.



Gráfica 2-6 Caudal en tiempo seco. Período 9 a 11 de Diciembre de 2011



Gráfica 2-7 Caudal en tiempo seco. Período 25 a 28 de Diciembre de 2011

Para los períodos presentados anteriormente se tienen los siguientes valores notables de caudal:

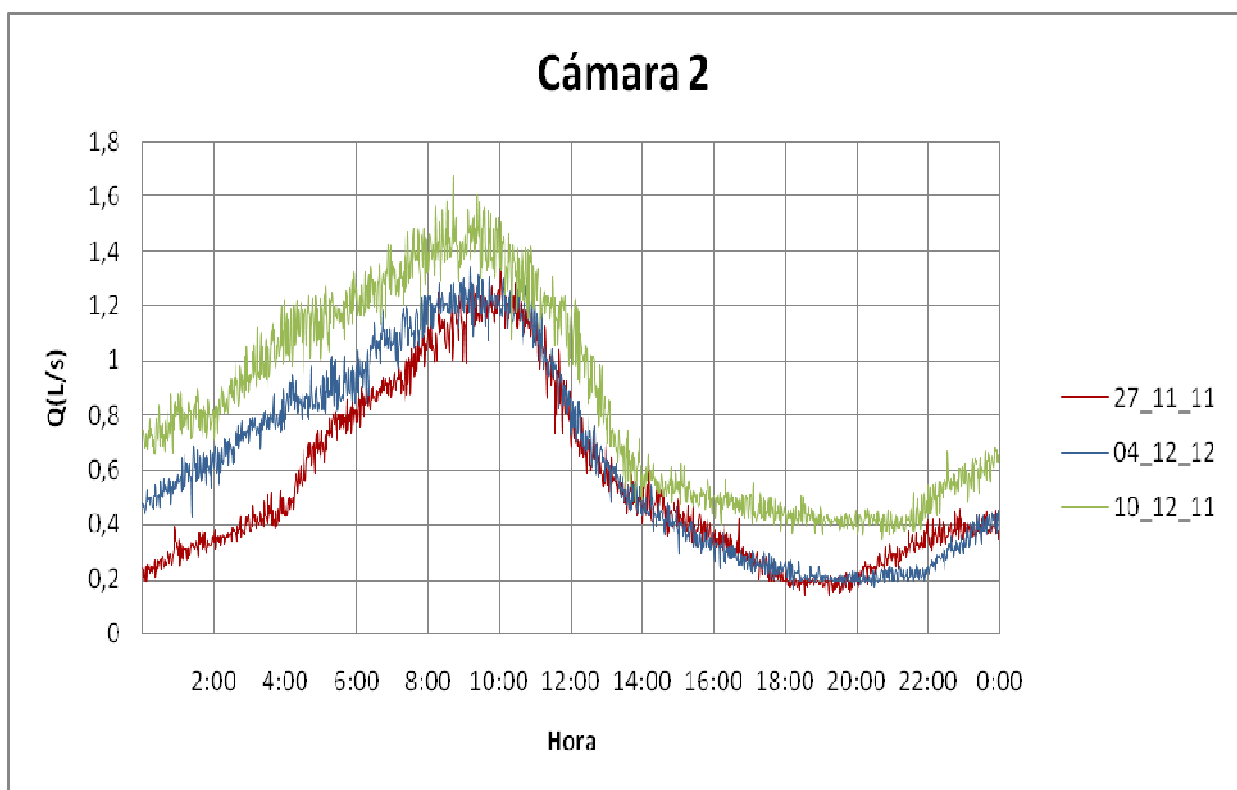
25/12/11 a 28/12/11		
Tiempo seco		
	Cámara 2	Cámara 1
mínimo	0,4	0,2
máximo	1,5	0,7
Promedio	1,0	0,4

Tabla 2-14 Caudales para tiempo seco período 25 a 28 de Diciembre del 2011

9/12/11 a 12/12/11		
Tiempo seco		
	Cámara 2	Cámara 1
mínimo	0,4	0,2
máximo	1,6	0,6
Promedio	0,9	0,4

Tabla 2-15 Caudales para tiempo seco período 9 a 12 de Diciembre del 2011

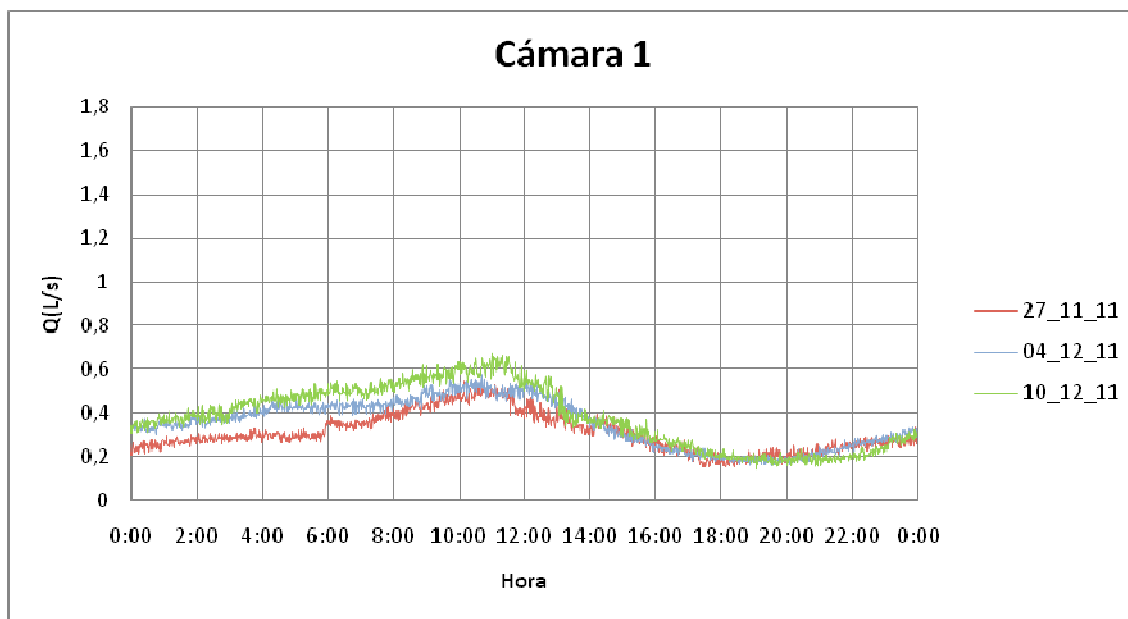
Para analizar mejor el comportamiento diario se grafican para cada cámara, los caudales de tres días de tiempo seco superpuestos.



Gráfica 2-8 Caudal registrado en Cámara 2 durante 24hs de tiempo seco para distintos días

Se observa que el pico se da aproximadamente entre las 9 y 10 de la mañana. Si bien la producción de lixiviados aumenta con el tiempo y con la cantidad de residuos sólidos dispuestos, el valor creciente con el tiempo (desde los 1,2 L/s a 1,5L/s aproximadamente en los picos), no representa la evolución de la producción de lixiviados, ya que no se están teniendo en cuenta variables climáticas más allá de la lluvia.

Los mínimos se registran aproximadamente entre las 19hs y 20 hs, con valores (crecientes también) desde 0,2L/s a 0,4L/s.



Gráfica 2-9 Caudal registrado en Cámara 1 durante 24hs de tiempo seco para distintos días

Realizando el mismo análisis para la cámara 1, se tiene que:

El pico se da aproximadamente a las 11 de la mañana y va desde los 0,5 L/s a 0,6L/s aproximadamente.

Los mínimos se registran aproximadamente a las 19hs, con un valor aproximado de 0,2L/s.

Análisis del comportamiento diario del lixiviado

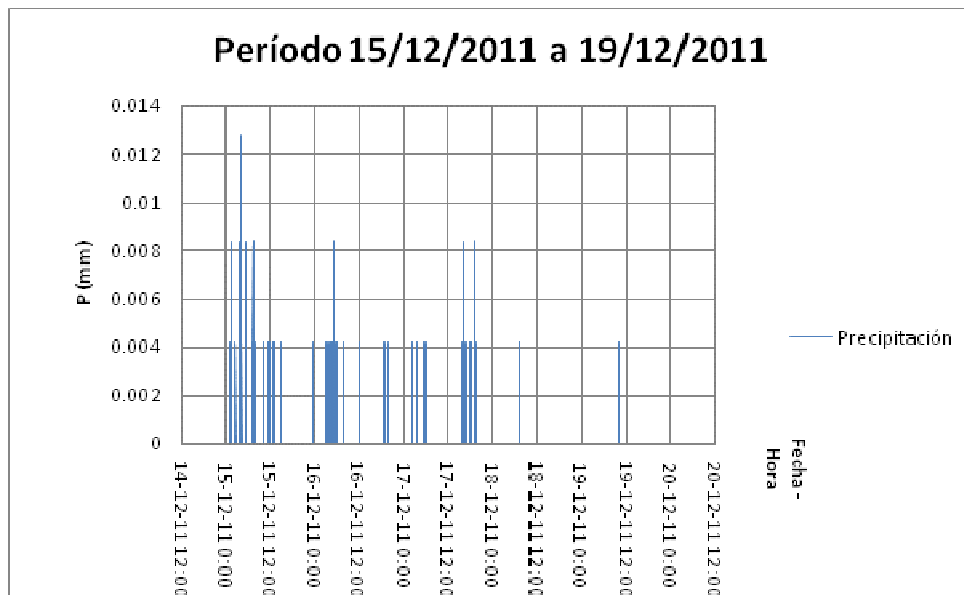
En un principio se podría suponer que este comportamiento se podría deber a la operación del Vertedero, las horas de ingreso de residuos y el horario de trabajo de compactación sobre éste. Esta justificación se descarta debido a que en ambas cámaras se observa el mismo comportamiento y la cámara 1 recibe lixiviado en tiempo seco solo de las celdas A y B, en las cuales se ha dejado de trabajar hace tiempo.

Al ser descartada la opción anterior, lo siguiente a asociar es con respecto a variables climatológicas. Se puede asociar su comportamiento a la temperatura diaria o a la evapotranspiración. Se observa que el lixiviado llega a un pico cerca de las 10 de la mañana y comienza a disminuir cuando la temperatura comienza a elevarse. Lo que no se puede explicar por esta semejanza es el comportamiento del valle cerca de las 20hs. Se descarta también esta relación debido a que las celdas A y B estaban tapadas con una capa de arcilla al momento de las mediciones, lo cual impide el relacionamiento del líquido con el exterior.

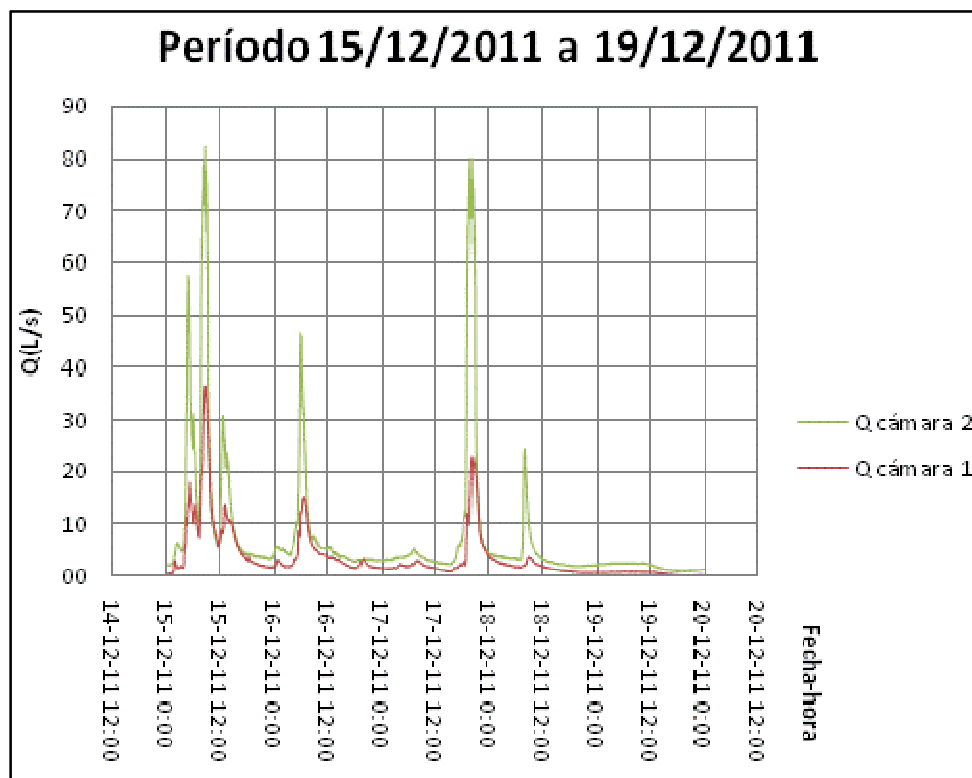
Otra suposición es que la actividad microbiana influye en el comportamiento diario del lixiviado. De todas formas éste fenómeno no es de interés para este proyecto ya que la planta de tratamiento contará con sistema de ecualización que amortiguará estas variaciones diarias.

2.4.3.2 Análisis de períodos de tiempo lluvioso

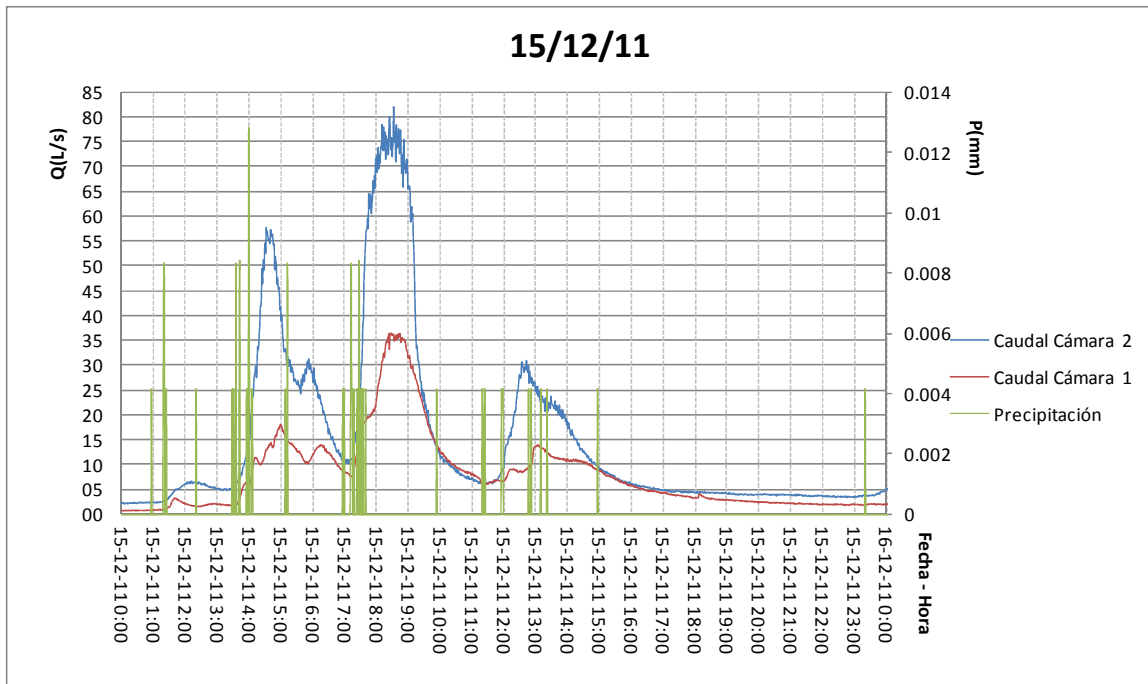
En las siguientes gráficas se muestran 3 precipitaciones registradas, y el comportamiento de los caudales en ambas cámaras asociados a esas lluvias.



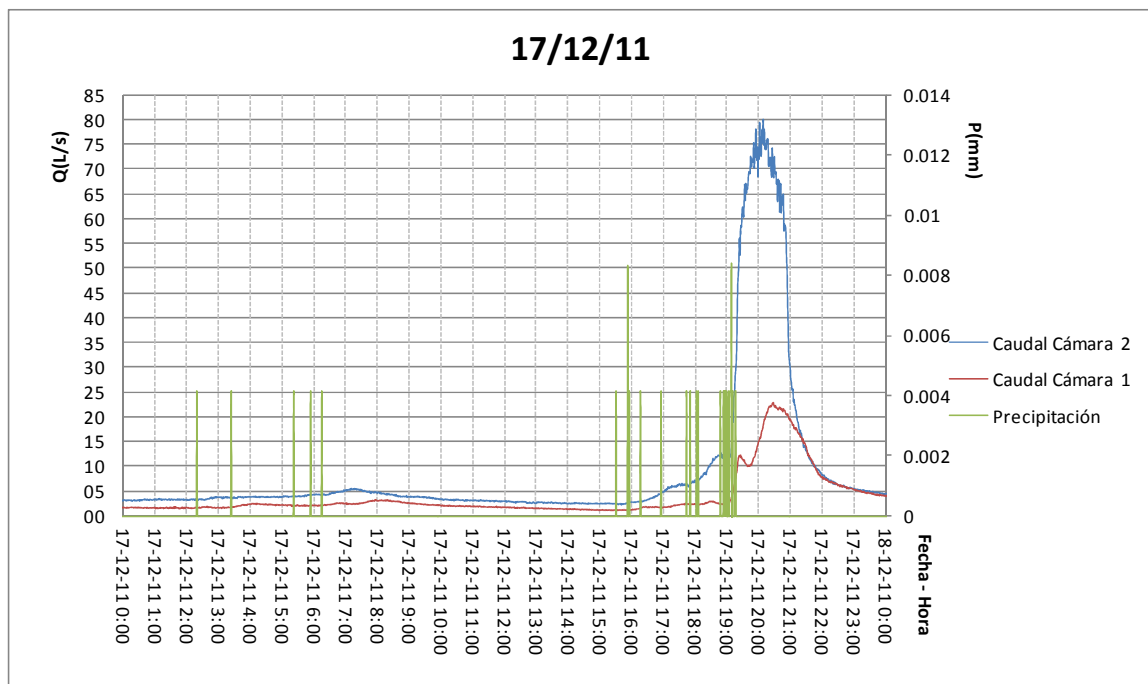
Gráfica 2-10 Precipitaciones durante el período 15 a 19 de Diciembre de 2011



Gráfica 2-11 Caudales registrados durante el período 15 a 19 de Diciembre de 2011



Gráfica 2-12 Superposición precipitación-caudal en día 15 de Diciembre de 2011



Gráfica 2-13 Superposición precipitación-caudal en día 17 de Diciembre de 2011

Nuevamente se observa que los lixiviados de ambas cámaras se comportan de forma similar en períodos de lluvia.

También se observa que en determinados períodos los caudales registrados exceden ampliamente la capacidad de aforo del Vertedero, por lo que no se puede decir con exactitud el caudal asociado a esa lluvia, sólo que es muy superior a 69 L/s.

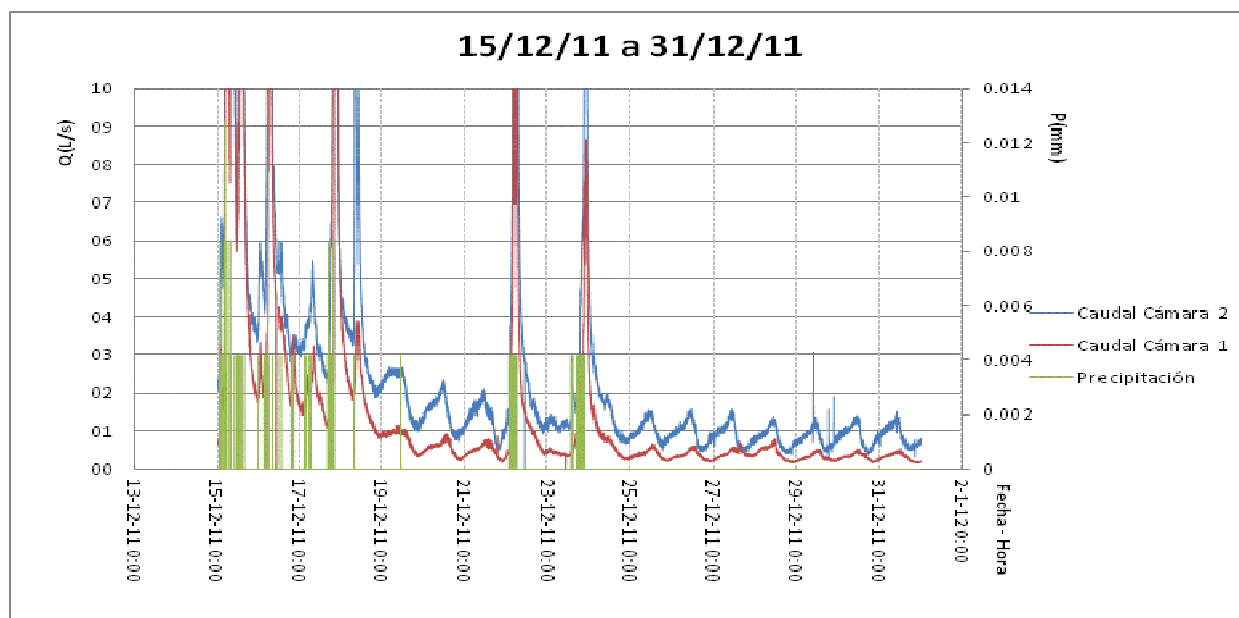
Por otro lado se estudia la recuperación de la curva de caudal después de la lluvia, y se observa que rápidamente después de la misma (en el correr de algunas horas) ya se recupera el comportamiento de caudal de tiempo seco, en el caso de lluvias aisladas. Cuando se tienen lluvias seguidas la recuperación es un poco más lenta, y en algún caso se registraron más de 48 hs.

2.4.3.3 *Análisis de períodos de tiempo seco y lluvioso eliminando aporte de agua pluvial*

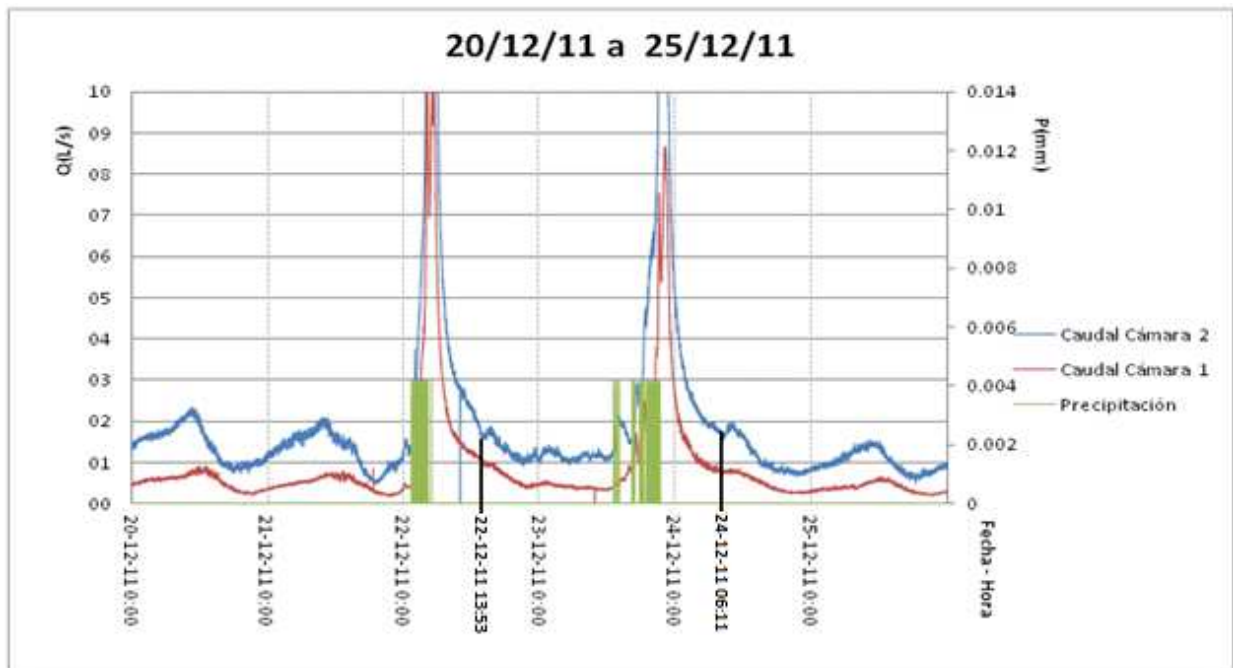
En esta sección se analizan los datos medidos abarcando tiempo seco y lluvioso, eliminando datos que seguramente son de aporte de pluviales y no de lixiviado.

El estudio fue realizado para la segunda quincena de Diciembre de 2011 debido a que había registros pluviométricos medidos por la empresa Espina para todo el período. Se eliminan los datos afectados por el escurrimiento superficial de la celda D, la cual se encontraba sin residuo al momento de las mediciones, hacia la cámara 2. Para esto se realiza un promedio de registros de caudal en la cámara 2 suprimiendo los siguientes datos:

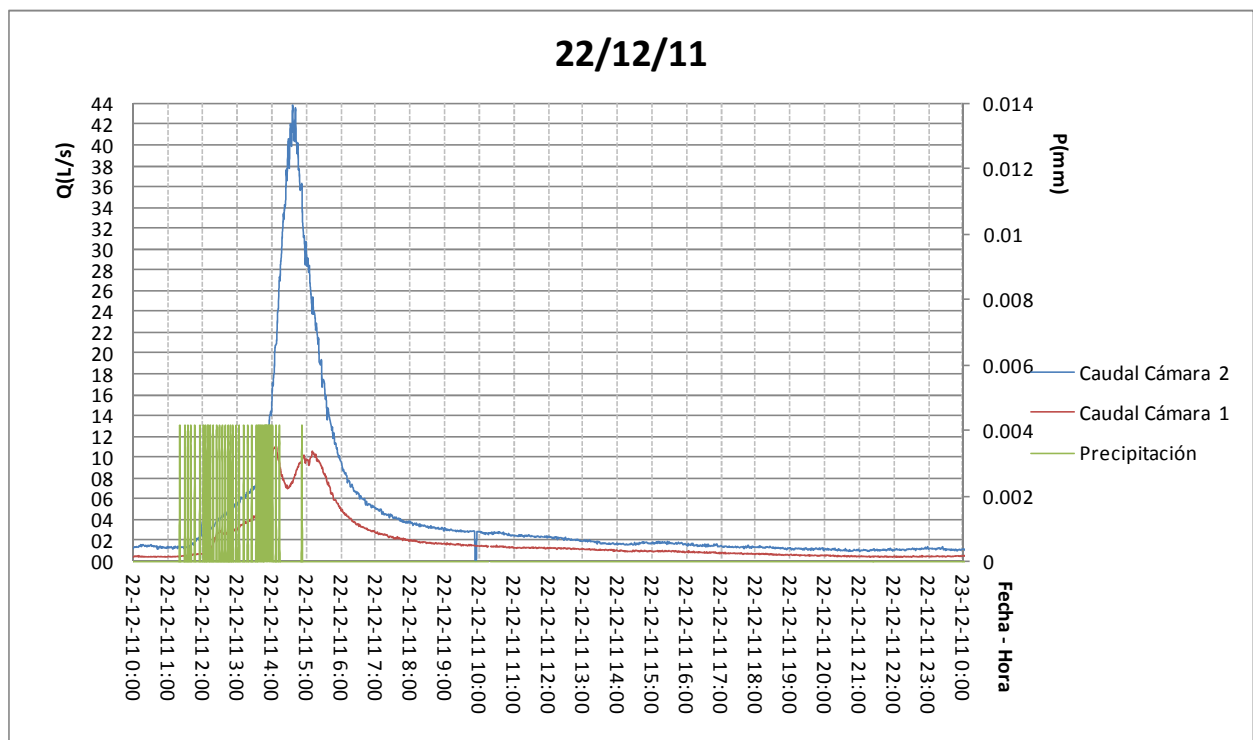
- Todo el período 15/12 a 19/12
- 22/12: Entre la hora 01:20 (comienzo lluvia) hasta la hora 13:53 (9 horas después de la finalización de la lluvia, se aprecia en la Gráfica 2-15 Superposición precipitación-caudal en el período 20 a 25 de Diciembre de 2011 que a partir de esa hora el caudal generado vuelve a comportarse como lo hacía previo a la lluvia)
- 23/12: Entre la hora 13:00 (comienzo lluvia) hasta 24/12 hora 06:11 (9 horas después de finalizada la lluvia, por el mismo criterio anterior)



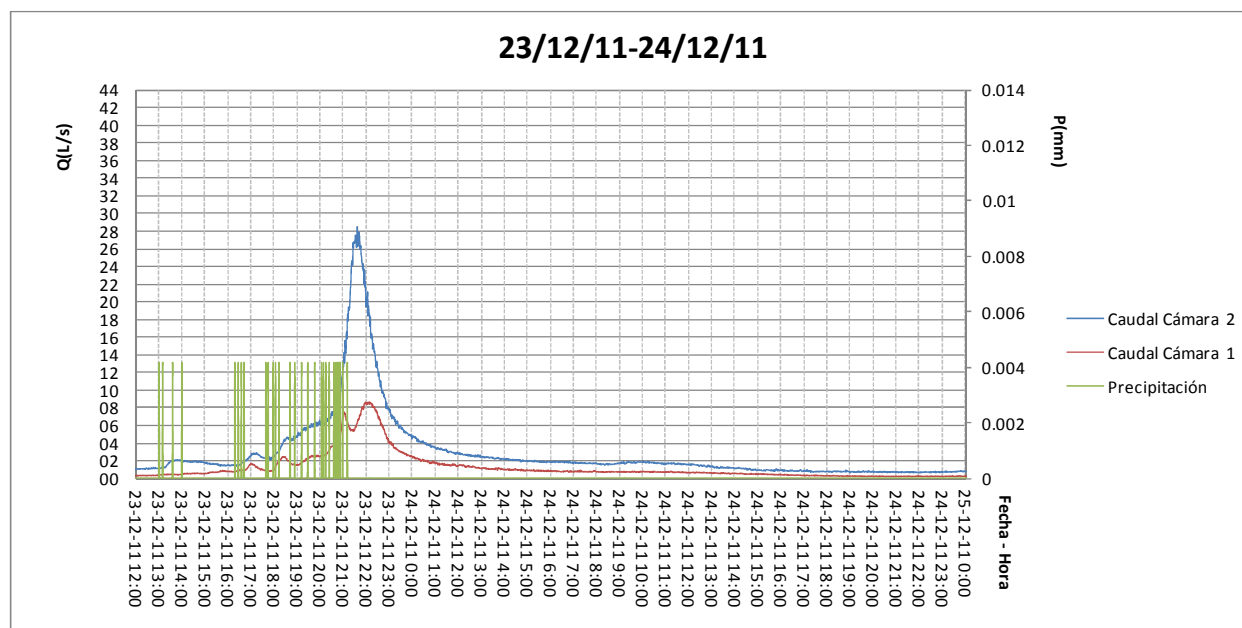
Gráfica 2-14 Superposición precipitación-caudal durante la segunda quincena de Diciembre de 2011



Gráfica 2-15 Superposición precipitación-caudal en el período 20 a 25 de Diciembre de 2011



Gráfica 2-16 Superposición precipitación-caudal durante el día 22 de Diciembre de 2011



Gráfica 2-17 Superposición precipitación-caudal en la tarde del día 23 y el día 24 de Diciembre de 2011

La siguiente tabla muestra un resumen de los caudales mínimos, máximos y promedios en ambas cámaras para la segunda quincena de Diciembre de 2011, eliminando los posibles aportes de escurrimiento directo sobre la celda D de la Usina 8.

15/12/11 a 31/12/11		
Tiempo lluvioso + seco (sin aportes pluviales de celda D)		
	Cámara 2	Cámara 1
mínimo	0,5	0,2
máximo	2,8	1,6
Promedio	1,4	0,6

Tabla 2-16 Resumen de caudales en ambas cámaras considerando el tiempo seco y lluvioso, eliminando los posibles aportes de escurrimiento directo aportado por la celda D de la Usina 8, impermeable en el momento de las mediciones.

El caudal máximo medido a fines de 2011 en la Cámara 2 es $Q_{promedio_Fin.2011} = 1,4L/s$. Esta cámara se encontraba recolectando el lixiviado de la celda C, cubierta por 8m de residuos.

Según el modelo de Tchobanoglous, el caudal máximo promedio a fines del año 2011 para la celda C es $Q_{Tchobanoglous_Fin.2011} = 8,5L/s$.

Se observa que el caudal estimado por el modelo de Tchobanoglous para el momento en que se realizaron las mediciones es aproximadamente 6 veces mayor al máximo medido.

2.4.4 Estimación de caudal máximo de lixiviados en el futuro por extrapolación de datos

Para estimar una producción máxima de lixiviados utilizando los datos de mediciones se puede realizar una regla de tres, considerando el volumen de residuos al momento de la toma de muestras, y el volumen máximo de residuos que puede esperarse en las celdas C y D.

Si bien este cálculo considera que la producción de lixiviado depende linealmente de la cantidad de residuos que existe, lo cual no es cierto, se puede obtener un valor aproximado del caudal de lixiviado a producirse en un futuro.

Este cálculo solo puede ser realizado considerando valores de caudales de tiempo seco y lluvioso, pero sin considerar los valores que se registraron al momento de la lluvia, ya que éstos consideran aguas pluviales que caen sobre la celda D (en ese momento vacía), por lo que no representan generación de lixiviados.

En el siguiente cuadro se pueden observar los cálculos realizados.

Area celda C (m ²)	62300
Altura celda C en período de mediciones (m)	8
Densidad residuos (kg/m ³)	780
Cantidad residuos (ton)	388752
Caudal promedio tiempo lluvioso y seco (l/s)	1,4
Cantidad final residuos (ton)	3988752
Caudal promedio extrapolado (l/s)	14,4

Tabla 2-17 Cálculo de caudal máximo para celdas C y D por extrapolación de valores medidos

Como se puede observar en los cálculos, extrapolando el caudal de lixiviado medido para la situación final se obtendría un caudal de lixiviado de **14,4 l/s para las celdas C y D**.

Es imposible con los datos medidos estimar un caudal para las celdas A y B, y para las usinas 6 y 7, ya que éstos caudales de lixiviados no fueron aforados.

2.5 Medidas estimadas de caudal realizadas en el año 2013

Se realizaron 2 visitas al Vertedero, una el día Jueves 20 de Marzo y la otra el Jueves 9 de Abril. La primera un día después de una lluvia y la siguiente en tiempo seco, en una semana sin lluvias.

En la primer visita todo el lixiviado perteneciente a las usinas 6,7 y 8 desembocaban en la cámara 2 a través de una tubería, en la cual se controló el tiempo en llenar un balde de 10L como se muestra en la Fotografía 2-1. Este procedimiento fue realizado 3 veces, resultando ser este tiempo 3 segundos,

con lo que el caudal estimado para ese día fue: $Q_{20Marzo_total} (L/s) = \frac{10L}{3s} = 3.3L/s$.



Fotografía 2-1 Medición de caudal en cámara 2

En la segunda visita, el lixiviado perteneciente a las usinas 6 y 7 y a las celdas A y B de la usina 8 llegaba en una tubería separada del de las celdas B y C de la usina 8 como se observa en la Fotografía 2-2 Descarga del lixiviado. Se realizó el mismo procedimiento anterior para ambas tuberías. El resultado fue el siguiente:

Usinas 6 y 7 y celdas A y B de la Usina 8: Tiempo en llenar el balde = 7 segundos

$$\Rightarrow Q_{9\text{Mayo}_{6;7;8A;8B}} (L/s) = \frac{10L}{20s} = 0.5L/s$$

Celdas C y D de la Usina 8: Tiempo en llenar el balde = 20 segundos

$$\Rightarrow Q_{9\text{Mayo}_{8C;8D}} (L/s) = \frac{10L}{7s} = 1.4L/s$$



Fotografía 2-2 Descarga del lixiviado

2.6 Comparación de diferentes caudales obtenidos

En esta sección se analizarán todos los caudales obtenidos mediante los diferentes métodos, optando por uno para la estimación del caudal de diseño de la planta de tratamientos, y fundamentando la decisión.

El siguiente cuadro resume los caudales obtenidos por cada uno de los métodos, junto con las ventajas y desventajas de los mismos.

Método	Caudal medio máximo	Ventajas	Desventajas
Modelo del HELP	Total Vertedero: 11,3 l/s. Celdas C y D: 2,3 l/s.	-Resultados con nivel de precisión diario. -Mayor cantidad de resultados -Considera muchas variables que otros modelos no consideran.	-Modelo pensado para utilizar en EEUU. -Es necesario asumir varias hipótesis. -Ejecución compleja.
Modelo del profesor Tchobanoglous	Total Vertedero: 16,88 l/s. Celdas C y D: 15,20 l/s.	-Modelo conceptualmente sencillo. -No está pensado para ninguna zona en particular. -Modelo abierto, se conoce el balance que realiza, por lo que puede adaptarse.	-Modelo pensado para un Vertedero con tapada diaria -Su resultado es un volumen anual de lixiviado, lo que dificulta conocer los picos obteniendo solo un caudal medio anual. -Es necesario asumir varias hipótesis.
Estimación mediante resultados medidos en campo	Celdas C y D: 14,40 l/s.	-Estimación utilizando datos verídicos. -Valores adaptados a la zona, clima y residuos que se utilizan y se utilizaran en el Vertedero.	-El comportamiento de los Rellenos Sanitarios no puede estimarse a futuro con una regla de tres, ya que intervienen varios factores imposibles de tener en consideración. -No se cuenta con datos suficientes de medidas de lixiviados de celdas A, B y usinas 6 y 7.

Cuadro 2-1 Cuadro comparativo de resultados de diferentes métodos de cálculo de caudal

La elección del método no resulta una tarea simple.

Como se observó en la comparación de los datos medidos en campo por la empresa Espina con el caudal obtenido con el modelo del profesor Tchobanoglous, este último resultó ser aproximadamente 6 veces mayor al caudal medido.

A su vez si se compara el caudal medido en campo en Mayo del 2013, se observa que el caudal estimado para ese momento según el modelo de Tchobanoglous, también es varias veces mayor, lo que lleva a concluir que el caudal de lixiviado medido con éste modelo está sobreestimado.

En cuanto a la extrapolación de los valores obtenidos en campo, no considera evolución de actividad microbiana, ni asentamiento de los residuos, ni estación del año (valores disponibles de diciembre), por lo que extrapolar este valor a una situación futura utilizando una regla de tres, acarrea errores que no se pueden corregir, por lo que esta opción es descartada.

Utilizando el modelo del HELP se observan valores más cercanos a los medidos. Realizando una simulación para la celda C, considerando 8 metros de altura (últimos 7 meses del 2011) se obtuvo un caudal de 0,9 l/s, que comparado con el caudal de 1,4 l/s promedio en tiempo lluvioso y seco en el final de ese período, o con el caudal de 0,9l/s registrado para tiempo seco, se estima que refleja aproximadamente la realidad.

También se observa que la suma de caudales para las usinas 6 y 7 y las celdas A y B de la usina 8 es 9,2 L/s, valor muy aproximado al estimado por Aborgama (8 L/s).

Por estos motivos se opta por considerar como guía para la estimación del caudal de diseño al obtenido por el HELP, siendo este el único que pudo contrastarse con los datos obtenidos en campo.

2.7 Caudal de diseño para planta de tratamiento de lixiviados

En la tabla siguiente se observan los caudales obtenidos mediante el HELP para todo el Vertedero.

Año	Usina 8 celdas A y B	Usina 8 celdas C y D	Usinas 6 y 7	Caudal medio (L/s)
2013	3,6	1,5	5,6	10,8
2014	3,6	2,3	5,5	11,3
2015	2,9	2,8	4,5	10,3
2016	2,4	3,2	3,6	9,1

Tabla 2-18 Resumen de caudales obtenidos por el HELP.

La planta de tratamientos se diseñará con un caudal medio anual de 11,3 L/s, correspondientes al caudal medio del año con mayor producción de lixiviados.

Cabe destacar que este es un caudal medio anual, por lo que se deberá prever un tanque ecualizador o un sistema de tratamiento capaz que absorber las variaciones que este caudal tendrá a lo largo del año.

Según recomendaciones de la EPA(6), es necesario considerar factores de seguridad de entre 3 y 5 para los picos que se generarán.

Si bien la EPA recomienda los factores de seguridad antes mencionados, estos son calculados para un Relleno Sanitario según su estricta definición. Por no contar el Vertedero de Felipe Cardoso con tapada diaria, este será muy susceptible a las lluvias, y los picos a esperar serán mucho mayores.

Como una estimación del lado de la seguridad se puede estimar que la laguna de ecualización recibe los lixiviados durante las tormentas según el método racional (para las celdas C y D sin tapada diaria ni final) variando parámetros de duración de tormenta de forma tal de obtener el volumen de almacenamiento necesario para la condición más desfavorable. Así la laguna tendrá una magnitud tal que podrá absorber cualquier pico de tormenta para el periodo de retorno considerado sumado al caudal de 8 L/s que puede aportar Aborgama.

Los cálculos fueron basados en el manual de DINASA(7). A continuación se presentan los cálculos realizados para el diseño del volumen máximo de la laguna de ecualización y las consideraciones tomadas.

Duración	7000	min
Intensidad	0,04	mm/min
Área	16500	m ²
C escorrentia	1	
Q hacia tto	0,011	m ³ /s
Tc	60	min
Qin max	0,018	m ³ /s
Vin	7761	m ³
Vin	7761	m ³
Vout durante	4762	m ³
V laguna ecu	2999	m³

Tabla 2-19 Diseño de laguna de equalización

La tormenta que requiere el mayor volumen de almacenamiento para no verter sin tratar el lixiviado es la de duración 7000 minutos (cinco días aproximadamente), obteniendo un volumen necesario para equalizar de 2999 m³. Esta tormenta tiene un caudal pico de 18 L/s.

Cabe destacar que para tormentas de menor duración los caudales picos serán mayores, no así el volumen necesario para almacenarlas.

Con esto se asegura que el lixiviado no se verterá directamente sin tratamiento al arroyo en tormentas con período de retorno menor o igual a 10 años.

3 Caracterización del lixiviado

3.1 Fases del proceso de degradación y estabilización de materia orgánica en un Vertedero

Existen varias fases en el proceso de degradación y estabilización de los residuos en los Vertederos o Rellenos Sanitarios.

En función de la fase en que nos encontremos serán las características de los lixiviados que allí se generen.

- **Fase I: Ajuste inicial.** En esta fase los componentes orgánicos biodegradables de los RSU sufren descomposición microbiana mientras se colocan en un Vertedero y poco después. En esta etapa la descomposición es bajo condiciones aerobias, ya que en la colocación y poco después se encuentra aire atrapado. La fuente principal de organismos responsables de la descomposición es el suelo que se utiliza como tapada diaria y final. Cuando ésta no es utilizada, el ajuste inicial puede demorar y la fuente principal de organismos responsables serán los propios residuos sólidos.
- **Fase II: Fase de transición.** En esta fase el oxígeno desciende y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. El Vertedero se convierte en anaerobio. El pH del lixiviado, si es que éste se forma, comienza a caer debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de CO₂ dentro del Vertedero.
- **Fase III: Fase ácida.** En esta fase se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas de hidrógeno. El pH del lixiviado, si se forma, frecuentemente caerá hasta un valor de 5 o menos, por la presencia ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO₂ dentro del Vertedero. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y la conductividad del lixiviado aumentarán significativamente durante esta fase debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado. También se solubilizarán durante esta fase algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados, debido a los bajos valores de pH en el lixiviado. Muchos nutrientes esenciales también se separan con el lixiviado en esta fase.]
- **Fase IV: Fase de fermentación del metano.** En esta fase el grupo de microorganismos metanogénicos comienza a ser más predominante. La formación de metano y ácido se produce simultáneamente, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida. Por este motivo el pH dentro del Vertedero subirá a valores más neutros, en el rango de 6,8 a 8. El pH del lixiviado, si se forma, subirá, y se reducirán las concentraciones de DBO₅ Y DQO y el valor de la conductividad. Con valores más altos de pH, menos constituyentes inorgánicos quedan en disolución y, como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado también se reducirán.
- **Fase V: Fase de maduración.** Se da luego que el material inorgánico biodegradable se ha convertido en CH₄ y CO₂. La generación de gas disminuye casi a cero y los sustratos que quedan en el Vertedero son de degradación lenta.

Parámetro	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
pH	6,7	4,7-7,7	6,3-8,8	7,1-8,8
DBO (mg/ L)	100-10900	1000-57700	600-3400	4-120
DQO (mg/ L)	480-18000	1500-71100	580-9760	31-900
DBO/ DQO	0,23-0,87	0,4-0,8	0,17-0,64	0,02-0,13
ST (mg/ L)	2050-2450	4120-55300	2090-6410	1460-4640
N-NH3 (mg/ L)	120-125	2-1030	6-430	6-430
N-NKT (mg/ L)	180-860	14-1970	25-82	7-490
P-PO4 (mg/ L)	0,6-1,7	0,2-120	0,7-14	0,2-14
Cr (mg/ L)	0,023-0,28	0,06-18	0,05	0.05

Tabla 3-1 Valores típicos de parámetros para lixiviados según(1)

3.2 Composición de lixiviados

La composición de los lixiviados es muy variable, ya que depende de la edad del Vertedero, del tipo de residuos que se dispongan, de condiciones climáticas, de forma de operación del Vertedero etc. Como vimos en la sección anterior, muestras de diferentes fases pueden tener valores muy diferentes de pH, DBO, DQO, y demás.

Hay que considerar que una muestra tomada en un Vertedero involucra varias, sino todas, las fases de descomposición, ya que en una muestra de lixiviado tendremos lixiviado de residuos jóvenes hasta antiguos, debido a que un Vertedero tiene diferentes capas y edades.

A continuación se presentan planillas con parámetros de lixiviados presentados por bibliografía. Se podrán observar los grandes rangos comprendidos entre los valores mínimos y máximos de cada parámetro en Vertederos jóvenes.

	Vertedero joven (menor a 2 años)		Vertedero maduro
	Rango	Típico	(mayor a 10 años)
DBO ₅ (mg/l)	2000-30000	10000	100-200
COT (mg/l)	1500-20000	6000	80-160
DQO (mg/l)	3000-60000	18000	100-500
Total sólidos en susp. (mg/l)	200-2000	500	100-400
Nitrógeno orgánico (mg/l)	10-800	200	80-120
Nitrógeno amoniacal (mg/l)	10-800	200	20-40
Nitrato (mg/l)	5-40	25	5-10
Total fósforo (mg/l)	5-100	30	5-10
Ortofosfato (mg/l)	4-80	20	4-8
Alcalinidad como CaCO ₃ (mg/l)	1000-10000	3000	200-1000
pH	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Dureza total como CaCO ₃ (mg/l)	300-10000	3500	200-500
Calcio (mg/l)	200-3000	1000	100-400
Magnesio (mg/l)	50-1500	250	50-200
Potasio (mg/l)	200-1000	300	50-400
Sodio (mg/l)	200-2500	500	100-200
Cloro (mg/l)	200-3000	500	100-400
Sulfatos (mg/l)	50-1000	300	20-50
Total hierro (mg/l)	50-1200	60	20-200

Tabla 3-2 Datos típicos sobre la composición de los lixiviados de Vertederos nuevos y maduros (Tchobanoglous)

Tabela 2.1 > Variação da composição do lixiviado para diferentes idades de aterros norte americanos

PARÂMETROS	IDADE DO ATERRO (ANOS)			
	0 a 5	5 a 10	10 a 15	> 20
DBO (mg/L)	10.000 - 25.000	1.000 - 4.000	50 - 1.000	< 50
DQO (mg/L)	15.000 - 40.000	10.000 - 20.000	1.000 - 5.000	< 1.000
NTK (mg/L)	1.000 - 3.000	400 - 600	75 - 300	< 50
N-NH ₃ (mg/L)	500 - 1500	300 - 500	50 - 200	< 30
SDT (mg/L)	10.000 - 25.000	5.000 - 10.000	2.000 - 5.000	< 1.000
pH	3 - 6	6 - 7	7 - 7,5	7,5
Cálcio (mg/L)	2.000 - 4.000	500 - 2.000	300 - 500	< 300
Sódio e potássio (mg/L)	2.000 - 4.000	500 - 1.500	100 - 500	< 100
Ferro e magnésio (mg/L)	500 - 1.500	500 - 1.000	100 - 500	< 100
Zinco (mg/L)	100 - 200	50 - 100	10 - 50	< 10
Cloreto (mg/L)	1.000 - 3.000	500 - 2.000	100 - 500	< 100
Sulfato (mg/L)	500 - 2.000	200 - 1.000	50 - 200	< 50
Fósforo (mg/L)	100 - 300	10 - 100	-	<10

Tabla 3-3 Variación de la composición de lixiviados para diferentes edades de Rellenos Sanitarios norteamericanos según (2)

Tabela 2.2 > Variação da composição do lixiviado gerado em aterros brasileiros			
VARIÁVEL	FAIXA MÁXIMA	FAIXA MAIS PROVÁVEL	FVMP (%)
pH	5,7 - 8,6	7,2 - 8,6	78
Alcalinidade total (mg/L de CaCO ₃)	750 - 11.400	750 - 7.100	69
Dureza (mg/L de CaCO ₃)	95 - 3.100	95 - 2.100	81
Condutividade (µS/cm)	2950 - 2.500	2950 - 17 660	77
DBO (mg/Lde O ₂)	< 20 - 30.000	< 20 - 8.600	75
DQO (mg/L de O ₂)	190 - 80.000	190 - 22.300	83
Óleos e graxas (mg/L)	10 - 480	10 - 170	63
Fenóis (mg/L de C ₆ H ₅ OH)	0,9 - 9,9	0,9 - 4,0	58
NTK (mg/L de N)	80 - 3.100	Não há	-
N-amoniaco (mg/L de N)	0,4 - 3.000	0,4 - 1.800	72
N-orgânico (mg/L de N)	5 - 1.200	400 - 1.200	80
N-nitrito (mg/L de N)	0 - 50	0 - 15	69
N-nitrato (mg/L de N)	0 - 11	0 - 3,5	69
P-total (mg/L)	0,1 - 40	0,1 - 15	63
Sulfeto (mg/L)	0 - 35	0 - 10	78
Sulfato (mg/L)	0 - 5.400	0 - 1.800	77
Cloreto (mg/L)	500 - 5.200	500 - 3.000	72
Sólidos totais (mg/L)	3 200 - 21.900	3 200 - 14.400	79
Sólidos totais fixos (mg/L)	630 - 20.000	630 - 5.000	60
Sólidos totais voláteis (mg/L)	2 100 - 14 500	2 100 - 8.300	74
Sólidos suspensos totais (mg/L)	5 - 2.800	5 - 700	68
Sólidos suspensos voláteis (mg/L)	5 - 530	5 - 200	62
Ferro (mg/L)	0,01 - 260	0,01 - 65	67
Manganês (mg/L)	0,04 - 2,6	0,04 - 2,0	79
Cobre (mg/L)	0,005 - 0,6	0,05 - 0,15	61
Níquel (mg/L)	0,03 - 1,1	0,03 - 0,5	71
Cromo (mg/L)	0,003 - 0,8	0,003 - 0,5	89
Cádmio (mg/L)	0 - 0,26	0 - 0,065	67
Chumbo (mg/L)	0,01 - 2,8	0,01 - 0,5	64
Zinco (mg/L)	0,01 - 8,0	0,01 - 1,5	70

Tabla 3-4 Variación de la composición de lixiviados generados en Rellenos Sanitarios brasileiros según (2)

Como se puede observar en las tablas presentadas anteriormente un lixiviado joven presenta valores muy diferentes a los presentados en un lixiviado maduro.

Las características ácidas de un Vertedero joven hacen que el lixiviado de éstos arrastre mayor cantidad de metales pesados y compuestos solubles. A su vez un lixiviado joven tendrá valores muy superiores de contaminantes que un Vertedero maduro, como ser DBO, DQO, Nitrógeno.

Las características ácidas y la mayor concentración de metales pesados y contaminantes hacen que los lixiviados jóvenes sean en ciertas ocasiones complejos de tratar, por presentar características tóxicas para los microorganismos.

3.2.1 Análisis de información previa de lixiviados del Vertedero Felipe Cardoso.

3.2.1.1 Datos aportados por Intendencia de Montevideo

En esta sección se presentan datos aportados por la Intendencia de Montevideo a la empresa Espina Obras Hidráulicas.

En la siguiente imagen se observan los diferentes puntos de muestra de lixiviados.



Figura 3-1 Imagen satelital aportada por la Intendencia de Montevideo con diferentes puntos de toma de muestras

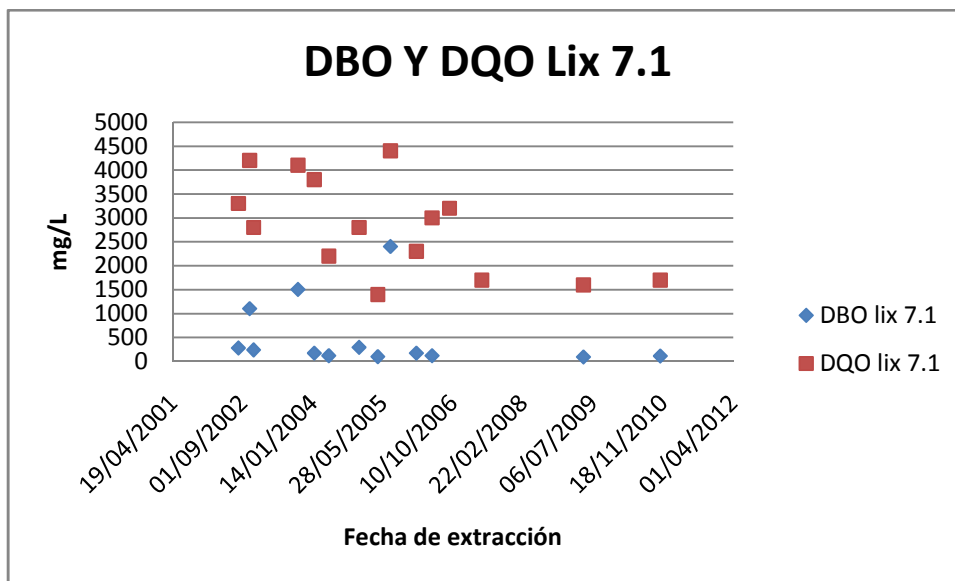
Usina 7

Lix 7.1								Lix 7.2							
Fecha	pH	DBO	DQO (mg/L)	N-NH3 (mg/L)	Ptot (mg/L)	Cr	Pb	Fecha	pH	DBO	DQO (mg/L)	N-NH3 (mg/L)	Ptot (mg/L)	Cr	Pb
		(mg/L)				(mg/L)	(mg/L)			(mg/L)				(mg/L)	(mg/L)
29/07/2002	8	280	3300	1100	15	1,6	0,3	29/07/2002	8	130	2000	520	7,8	0,5	0,3
18/10/2002	8	1100	4200	1600	11	0,8	0,3	18/10/2002	8	130	1800	630	3,7		
15/11/2002	8	240	2800	1200	9,7	1	0,3	15/11/2002	8	170	3600	1200	13,7	0,8	0,3
27/09/2003	8	1500	4100	1500	13	0,7	0,3	27/09/2003	9	40	1700	490	4	0,3	0,3
22/01/2004	8	170	3800	1900		0,3	0,3								
05/05/2004	8	120	2200	1300	12	1,4	0,3								
07/12/2004	9	290	2800	1800	13	2,3	0,7								
20/04/2005	8	100	1400	1900	12	1	0,3								
20/07/2005	8	2400	4400	4600	7,7	0,7	0,3								
20/01/2006	8	170	2300	840	13	1,5	0,3								
12/05/2006	9	120	3000	1100	8,8	2,4	0,3								
14/09/2006	9		3200	1900	17	2,7	0,3								
03/05/2007	8		1700	1000	10,6	1,1	0,3								
28/04/2009	8	90	1600	841	10	0,9	0,3								
29/10/2010	8	110	1700	960	8,6	0,9	0,3								

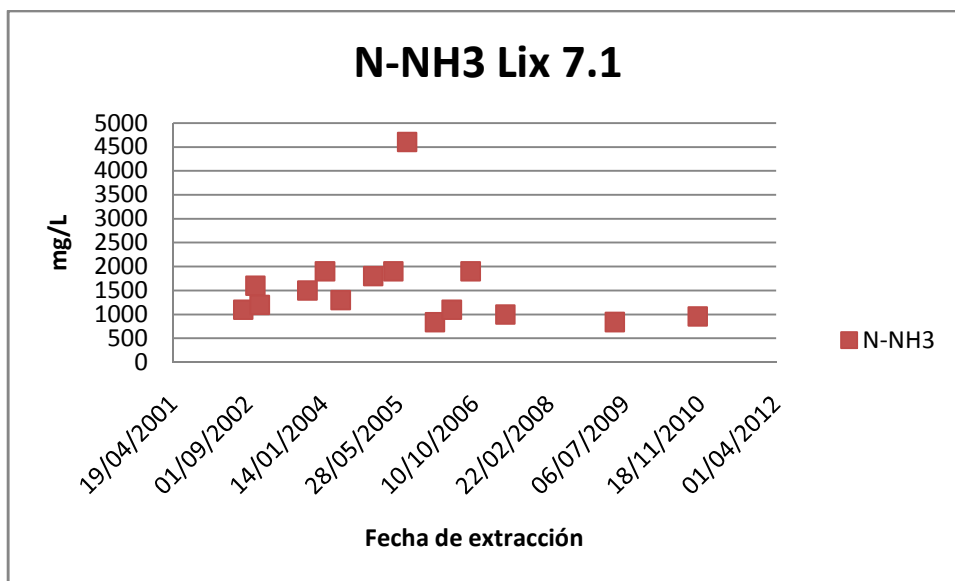
Tabla 3-5 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviados 7.1 y 7.2

Lix 7.3						
Fecha	pH	DBO	DQO	N-NH3	Ptot	Cr
		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
21/07/2009	7,5	Interferencia	620	450	5	0,3

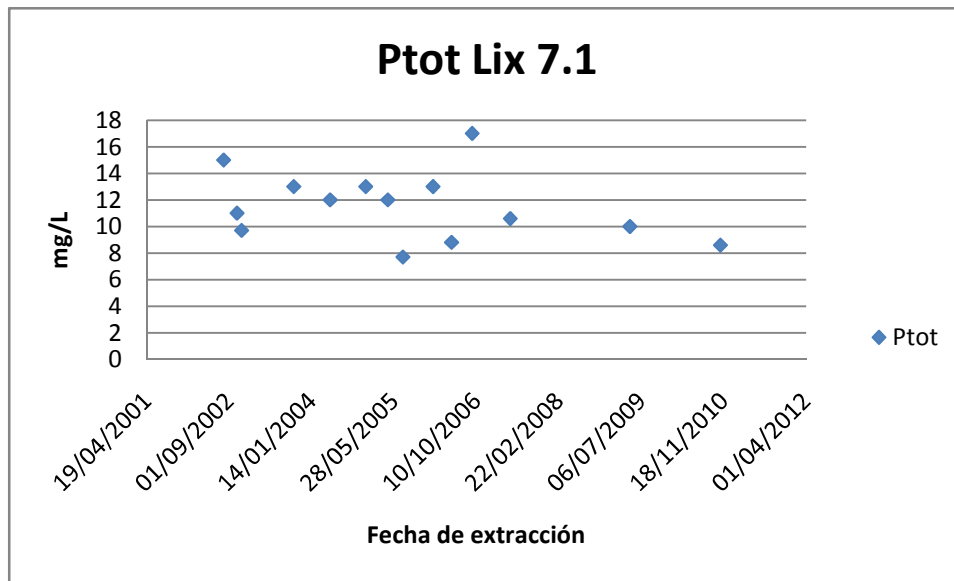
Tabla 3-6 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviados 7.3



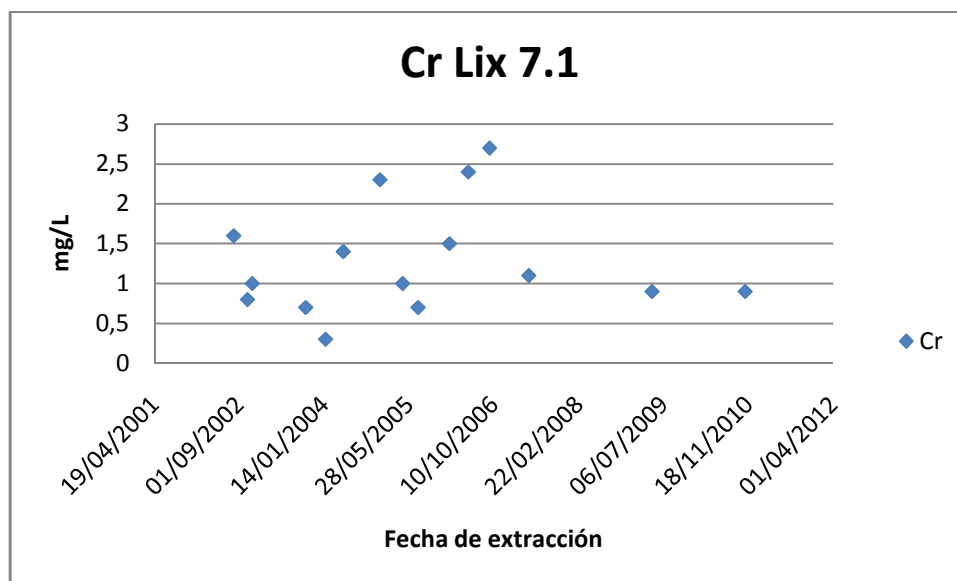
Gráfica 3-1 DBO Y DQO medidos por la IM para lixiviado 7.1



Gráfica 3-2 N-NH₃ medido por la IM para lixiviado 7.1



Gráfica 3-3 P_{total} medido por la IM para lixiviado 7.1



Gráfica 3-4 Cr medido por la IM para lixiviado 7.1

Usina 8

Lix 8.1 (Correspondiente a usina 8, celda A)							
Fecha	pH	DBO	DQO (mg/L)	N-NH3 (mg/L)	Ptot (mg/L)	Cr	Pb
		(mg/L)				(mg/L)	(mg/L)
29-jul-02	8,1	6900	9700	170	4	0,2	0,3
04-sep-02	7,3	3300	4200	61	0,6	0,2	0,3
18-oct-02	6,7	3400	5400	110	1,6	0,2	0,3
15-nov-02	7,9	2200	4500	150	2,8	0,2	0,3
08-ene-03	9	440	2000	50	4,8	0,2	0,3
21-mar-03	8,2	990	3700	160	6,2	0,2	0,7
27-sep-03	7,9	3600	6300	85	14	0,4	0,3
22-ene-04	8,2	4500	11800	850		0,7	1,5
11-feb-04	8,6	5800	13400	760			
17-feb-04	8,1	7100	12100		21		
25-feb-04	7,9	13600	19200	800	9,7		
02-mar-04	8	8300	14200	770	9,2		
15-abr-04	8,2	3700	8000	1000	6,2		
05-may-04	8,2	3300	7600	850	9,1	1,8	0,3
18-jun-04	8,3	800	4300				
21-jun-04	8,4	950	3400				
23-jun-04	8,2	1400	4200				
25-jun-04	8,2	870	3800				
28-jun-04	8,3	550	3800				
30-jun-04	8,3	710	2600				
02-jul-04	8,2	550	4100				
05-jul-04	8,2	570	4500				
09-jul-04	8,5	670					

Tabla 3-7 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.1

Lix 8.1 (Correspondiente a usina 8, celda A)							
Fecha	pH	DBO	DQO (mg/L)	N-NH3 (mg/L)	Ptot (mg/L)	Cr	Pb
		(mg/L)				(mg/L)	(mg/L)
24-sep-04	8,6	420	4400	930	9,0	1,9	0,3
07-dic-04	8,7	2500	6900	1300	9,6	2,3	0,3
20-abr-05	8,4	1600	2900	850	15,0	1,6	0,3
20-jul-05	8,4	410	2500	340	12,0	1,4	0,3
21-oct-05	8,2	100	2900	430	12,0	1,5	0,3
20-ene-06	8,4	130	2300	490	14,0	1,6	0,3
12-may-06	8,5		3000	990	7,7	2,4	0,3
14-sep-06	8,9		2300	650	9,0	1,1	0,3
03-may-07	8,6		2200	630	6,6	0,9	0,3
24-may-07	8,2		1400			0,9	0,3
25-oct-07	8,2		2900	820	9,2	2,5	0,3
12-nov-08	9,0	1100	10300	2600	9,4	14	
28-abr-09	8,0	1400	12000	3713	34,0	14	
21-jul-09	8,0		4700	1800	14,0	4,3	
29-oct-10	8,3	410	6600	1800	25,0	8,2	

Tabla 3-8 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.1

Lix 8.2							
Fecha	pH	DBO	DQO (mg/L)	N-NH3 (mg/L)	Ptot (mg/L)	Cr (mg/L)	Pb (mg/L)
		(mg/L)					
03/05/2007	8,1	820	4200	950	5,1	3,2	0,3
24/05/2007	8,2	750	4300			4,0	0,3
25/10/2007	7,5	4100	4600	1700	14	4,3	0,3
12/11/2008	9,0	1600	11200	3500	15	12,0	0,3
28/04/2009	8,0	440	6800	2651	20	7,1	0,3
29/10/2010	8,4	250	6200	2300	23	5,0	0,3

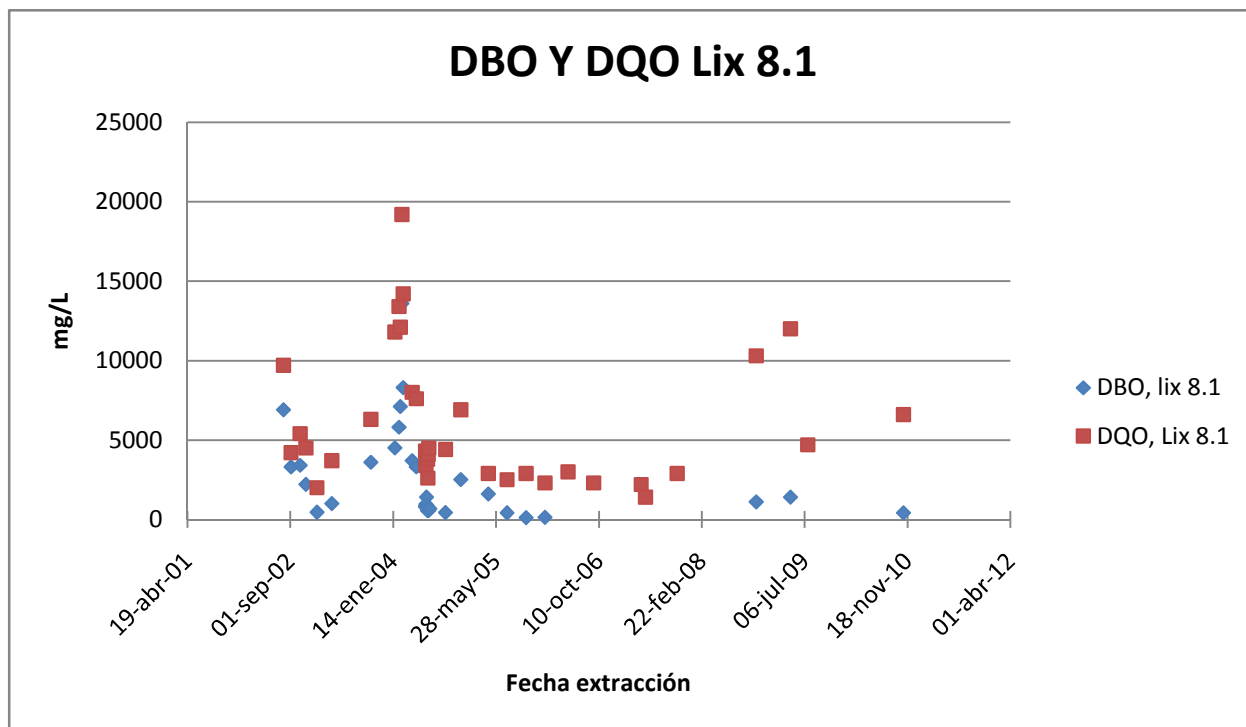
Tabla 3-9 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.2

Lix 8.4 (Correspondiente a usina 8, celda B)							
Fecha	pH	DBO	DQO (mg/L)	N-NH3 (mg/L)	Ptot (mg/L)	Cr	Pb
		(mg/L)				(mg/L)	(mg/L)
21/07/2009	7,5		15000	1800	16	1,7	
29/10/2010	8,2	4600	12000	1500	17	3,0	0,7

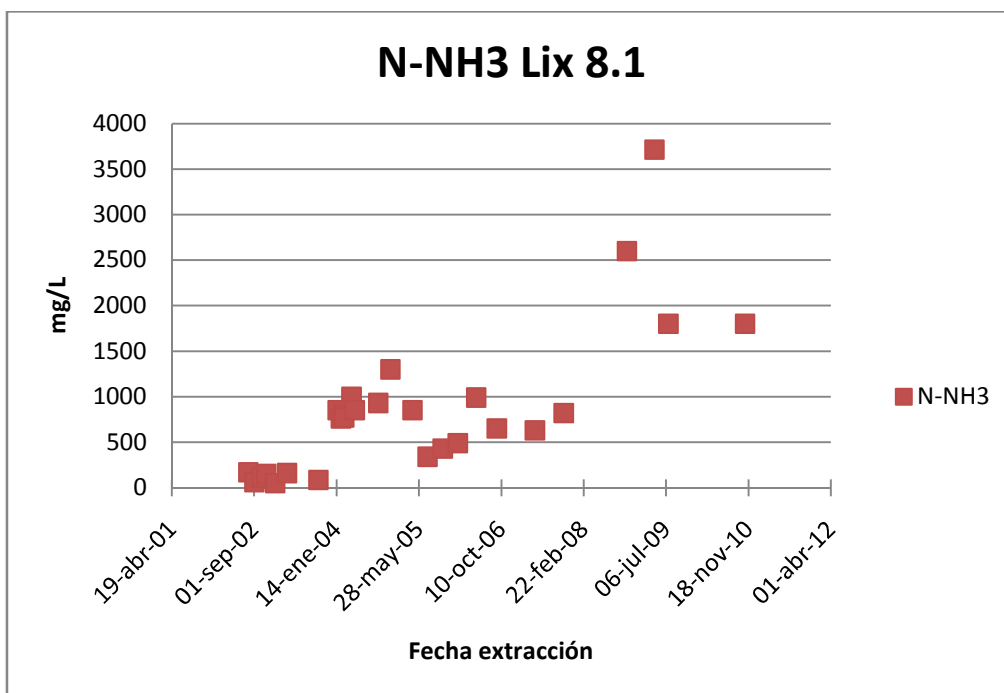
Tabla 3-10 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.4

Lix 8.5 (Correspondiente a usina 8, celda A)						
Fecha	pH	DBO	DQO (mg/L)	N-NH3 (mg/L)	Ptot (mg/L)	Cr
		(mg/L)				(mg/L)
21/07/2009	7,5		6700	4900	31	11

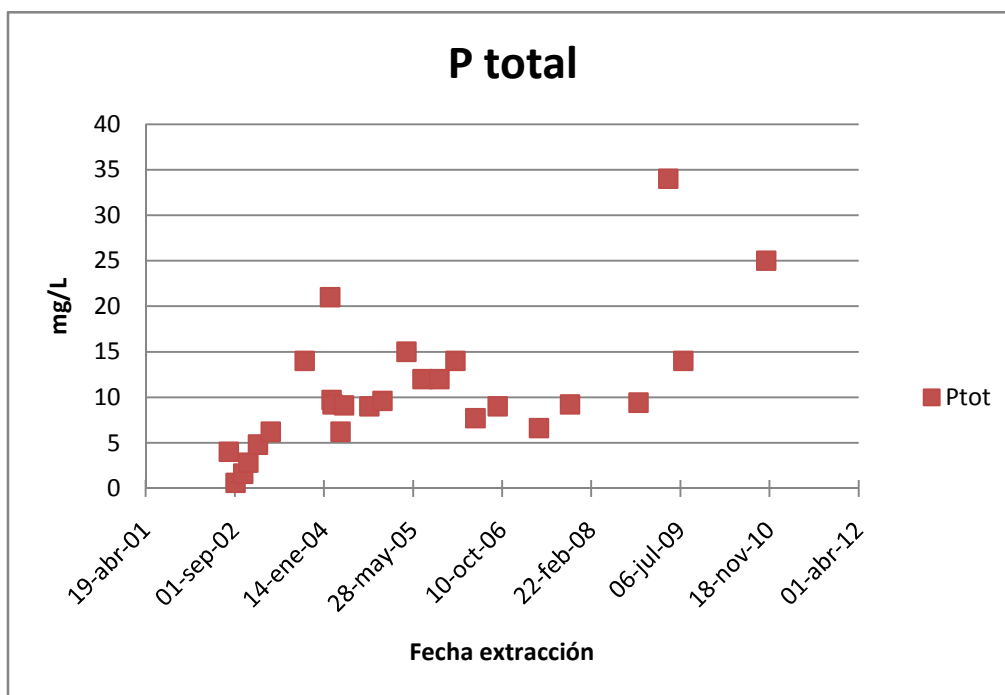
Tabla 3-11 Datos aportados por la Intendencia de Montevideo. Lixiviado 8.5



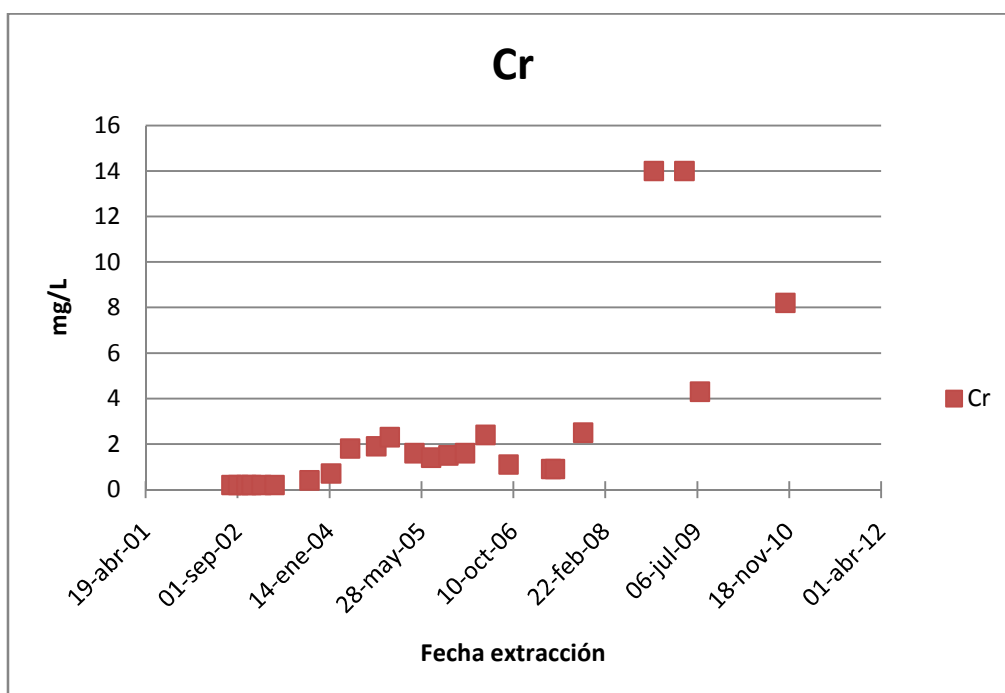
Gráfica 3-5 DBO Y DQO medidos por la IM para lixiviado 8.1



Gráfica 3-6 N-NH₃ medido por la IM para lixiviado 8.1



Gráfica 3-7 P total medido por la IM para lixiviado 8.1



Gráfica 3-8 Cr medido por la IM para lixiviado 8.1

Análisis de datos recibidos por la IM

La usina 7 fue clausurada en el año 2002. Es de esperar que a la fecha el lixiviado que presente corresponda a la fase 5, de estabilización. Según estudios de la IM, a finales del año 2010, el lixiviado proveniente de la usina 7 presentaba características de un lixiviado “casi” estabilizado, según valores que se indican en siguiente tabla.

Fecha	Parámetro	Valor	Valor típico fase 4	Valor típico fase 5
29/10/2010	pH	8,1	6,3-8,8	7,1-8,8
29/10/2010	DBO (mg/L)	110	600-3400	4-120
29/10/2010	DQO (mg/L)	1700	580-9760	31-900
29/10/2010	N-NH3 (mg/L)	960	6-430	6-430
29/10/2010	PTOT (mg/L)	8,6	0,7-14	0,2-14
29/10/2010	Cr (mg/L)	0,9	0,05	0,05

Tabla 3-12 Comparación de valores de lixiviado 7.1 de usina 7 con valores típicos según fases de descomposición

Fecha	Parámetro	Valor	Valor típico fase 4	Valor típico fase 5
27/09/2003	pH	9,0	6,3-8,8	7,1-8,8
27/09/2003	DBO (mg/L)	40	600-3400	4-120
27/09/2003	DQO (mg/L)	1700	580-9760	31-900
27/09/2003	N-NH3 (mg/L)	490	6-430	6-430
27/09/2003	PTOT (mg/L)	4,0	0,7-14	0,2-14
27/09/2003	Cr (mg/L)	0,9	0,05	0,05

Tabla 3-13 Comparación de valores de lixiviado 7.2 de usina 7 con valores típicos según fases de descomposición

Como se puede observar el valor de DBO correspondería un lixiviado en fase 5, sin embargo el valor de DQO correspondería a uno en fase 4. Considerando las duraciones estimadas para cada fase, se entiende que el lixiviado debería encontrarse en fase 5, explicando las diferencias encontradas con los valores típicos debido a la fuerte dependencia entre las características del lixiviado, y las características de los residuos sólidos dispuestos.

En los resultados obtenidos para la usina 8, lixiviado 8.1, no se puede observar un comportamiento de la evolución de los parámetros que coincida con el comportamiento esperado según bibliografías. Se observa una fuerte irregularidad, presentando los parámetros DQO, Ptot, N-NH3 y Cr un pico entre las fechas noviembre 2008, y abril 2009 que no se puede explicar según bibliografía.

El lixiviado 8.2 también presenta un pico en sus parámetros en el mismo intervalo de fechas antes mencionado.

Los lixiviados 8.4 y 8.5 se desestiman por no haberse registrado más de 2 muestras.

3.2.1.2 Datos aportados por la empresa Espina Obras Hidráulicas

Usina 5

La empresa Espina Obras Hidráulicas realizó cateos en la usina 5 hasta 9 metros de profundidad sin encontrar indicios de generación de lixiviados. Se asume que por la antigüedad de la usina éstos ya no se generan más.

Usinas 6 y 7

En la siguiente imagen se pueden observar los puntos de extracción utilizados por la empresa Espina (1).



Figura 3-2 Puntos de muestreo de usinas 5, 6 y 7 de empresa Espina

	21/12/2011			05/01/2012			18/01/2012		Promedio
	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 4	Pozo 5	Pozo 6	Pozo 7	Pozo 8	
pH	8,0	7,9	7,0	7,4	7,4	8,1	7,4	7,4	7,6
SST (mg/ L)	674	1662	2290	602	1360	1310	675	1250	1227,9
DBO (mg/ L)	868	838	204	60	94	210	1146	297	464,6
DQO (mg/ L)	8860	9386	3549	1893	1499	6783	1603	2812	4548,1
(DBO/ DQO)	0,10	0,09	0,06	0,03	0,06	0,03	0,71	0,11	0,10
N-NH4 (mg/ L)	7960	6430	968	2020	1690	5535	2270	3210	3760,4
(N-NH4/ DQO) (%)	89,8	68,5	27,3	106,7	112,7	81,6	141,6	114,1	82,7
P total (mg/ L)	45,5	40,7	14,0	19,0	59,0	34,0	28,7	25,7	33,3
(P/ DQO) (%)	0,5	0,4	0,4	1,0	3,9	0,5	1,8	0,9	0,7
Cr (mg/ L)	9,7	4,4	1,0	9,2	0,8	0,4	0,3	1,6	3,4
Plomo (mg/ L)	<0,3	0,4	<0,3	0,5	0,3	0,7	0,4	0,5	

Tabla 3-14 Datos aportados por la empresa Espina. Lixiviado proveniente de usinas 6 y 7

Como se puede observar en la tabla el lixiviado de los cateos realizados por Espina podría ser calificado como un lixiviado maduro, o en vías de madurez (Fase 4 y 5). Sin embargo algunos valores se apartan de los valores típicos de lixiviados de Rellenos Sanitarios, como el Cromo y el Nitrógeno. Esto puede darse debido al fuerte aporte de curtiembre y otras industrias que no realizan un correcto tratamiento a sus residuos, e ingresan al Vertedero sin mayores exigencias.

Usina 8

En la Figura 2-8 Cámaras de aforo y muestreo utilizadas por Espina se observan los puntos de muestreo utilizados para la usina 8. La cámara 1 recibe lixiviados de los taludes externos de las celdas A y B, mientras que la cámara 2 recibe lixiviados de las celdas C y D y taludes internos de las celdas A y B.

Para la toma de muestras Espina realizó el siguiente procedimiento. En ambas cámaras se tomaron:

- medidas en “tiempo seco”, correspondiente a días que llevaban al menos una semana sin llover.
- medidas en “tiempo de lluvia”, correspondientes a medidas realizadas al momento de la lluvia y determinadas horas luego de finalizada la misma.

Medidas cámara 1

Tiempo seco:

Fecha	27-sep	28-oct	21-dic	05-ene	03-feb
Tipo	Puntual	Puntual	Puntual	Compuesta	Compuesta
pH	8,2	8,5	8,5	8,8	8,6
SST	218	74	470	780	2440
DBO	547	1932	400	442	886
DQO	7304	7025	5653	7388	8436
DBO/ DQO	0,07	0,28	0,07	0,06	0,11
N-NH4	2976	2270	2180	2570	1590
% N	40,74	32,31	38,56	34,79	18,85
Ptotal	17,0	15,5	20,3	21,0	15,9
% P	0,23	0,22	0,36	0,28	0,19
Cr	7,8	7,4	6,8	5,0	10,3
Plomo			<0,3	0,6	0,4

Tabla 3-15 Datos aportados por empresa Espina. Lixiviado en cámara 1, tiempo seco

Tiempo de lluvia:

Fecha	06-dic	25-ene			
Tipo	Puntual	Puntual 6hs	Puntual 12hs	Puntual 24hs	Puntual 48hs
pH	8,4	8,1	8,2	8,2	8,4
SST	194	47	893	126	82
DBO	151	103	108	103	103
DQO	1893	1183	2891	3127	4205
DBO/ DQO	0,08	0,09	0,04	0,03	0,02
N-NH4	973	290	506	804	1185
% N	51,4	24,51	17,5	25,71	28,18
Ptotal	8,4	5,8	7,9	10,9	10,3
% P	0,44	0,49	0,27	0,35	0,24
Cr	3,3	0,2	2,1	3,4	3,3
Plomo		1,3	0,1	0,2	0,2

Tabla 3-16 Datos aportados por empresa Espina. Lixiviado en cámara 1, tiempo de lluvia

Medidas cámara 2

Tiempo seco:

Fecha	27-sep	28-oct	21-dic	05-ene	03-feb
Tipo	Puntual	Puntual	Puntual	Compuesta	Compuesta
pH	7,8	7,8	8,3	8,7	8,4
SST	2808	252	78	810	1280
DBO	9390	6820	3228	1170	6180
DQO	10829	10690	10070	10785	11425
DBO/ DQO	0,87	0,64	0,32	0,11	0,54
N-NH4	1510	1260	2170	3430	2810
% N	13,94	11,79	21,55	31,8	24,6
Ptotal	18,6	11,6	19,4	24	12,4
% P	0,17	0,11	0,19	0,22	0,11
Cr	6,1	4,6	7,1	9,4	7,2
Plomo			<0,3	0,5	0,4

Tabla 3-17 Datos aportados por empresa Espina. Lixiviado en cámara 2, tiempo seco

	05-ene		
	Llano	Medio	Punta
pH	8,5	8,5	8,5
SST	210	178	212
DBO	3120	3150	4125
DQO	10631	10734	10274
DBO/DQO	0,29	0,29	0,40
N-NH4	3740	4560	4290
% N	35,18	42,48	41,76
Ptotal	20,4	17,0	17,8
% P	0,19	0,16	0,17
Cr	9,8	9,5	8,0
Plomo	0,7	0,5	0,7

Tabla 3-18 Datos aportados por empresa Espina. Parámetros para cámara 2, en función de los picos de caudal

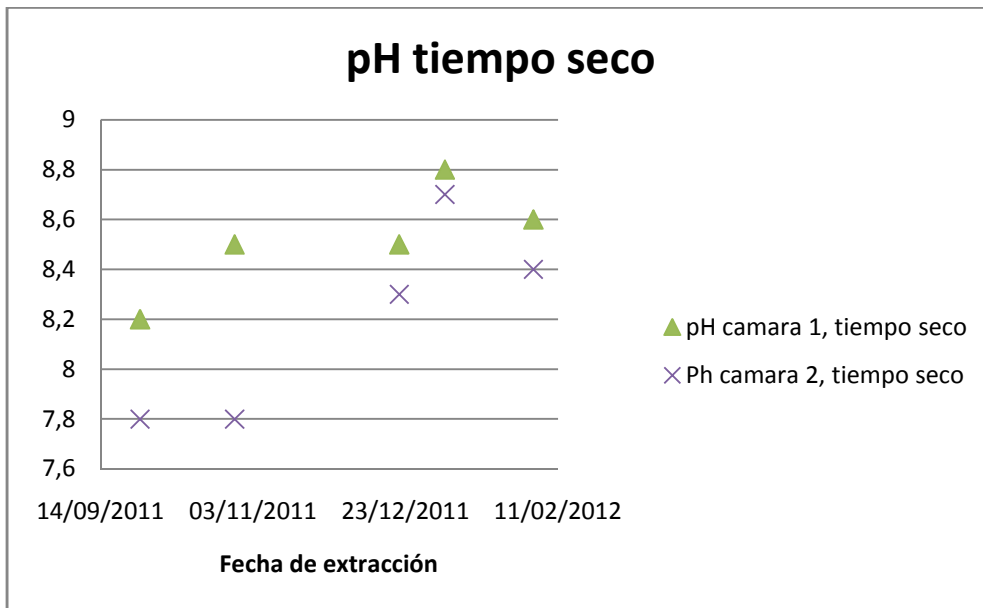
Cabe aclarar que Espina realizó ensayos adicionales al lixiviado de la cámara 2 por entender que éste es el que aporta más carga a la planta de tratamiento de lixiviados.

Tiempo de lluvia:

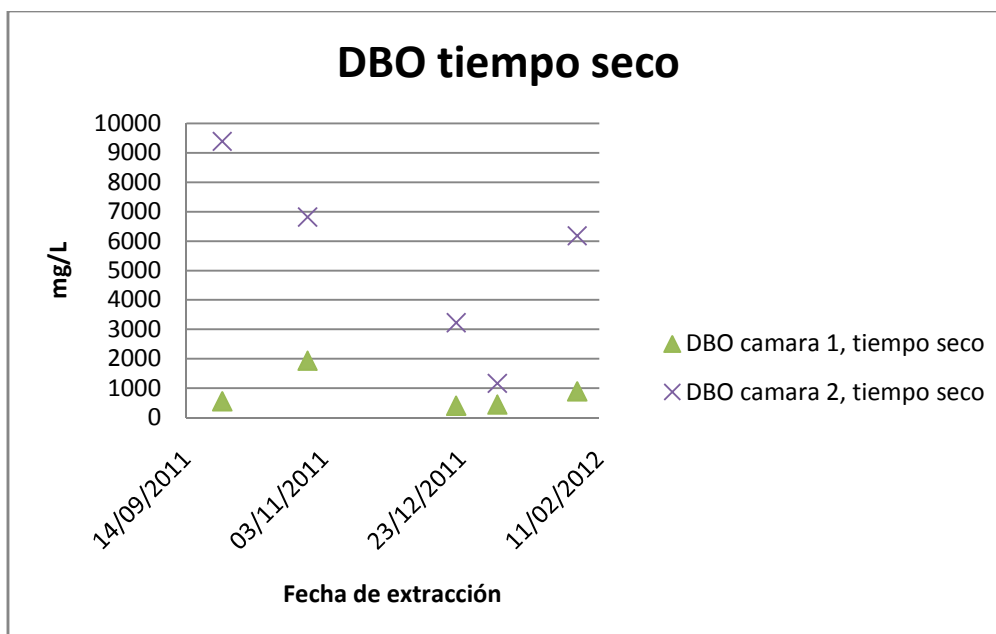
Fecha	06-dic	25-ene			
Tipo	Puntual	Puntual 6hs	Puntual 12hs	Puntual 24hs	Puntual 48hs
pH	8,4	8,8	8,4	8,1	8,0
SST	400	288	2130	8010	9120
DBO	2861	1629	6517	9724	13009
DQO	7703	206	723	2325	3490
DBO/ DQO	0,37	5,4	5,9	10,7	11,7
N-NH4	1208	1,5	2,5	2,9	3,0
% N	15,68	0,2	0,1	0,3	0,4
Ptotal	12,4	5,8	7,9	10,9	10,3
% P	0,16	0,49	0,27	0,35	0,24
Cr	4,7	0,2	2,1	3,4	3,3
Plomo		1,3	0,1	0,2	0,2

Tabla 3-19 Datos aportados por empresa Espina. Lixiviado cámara 2, tiempo de lluvia

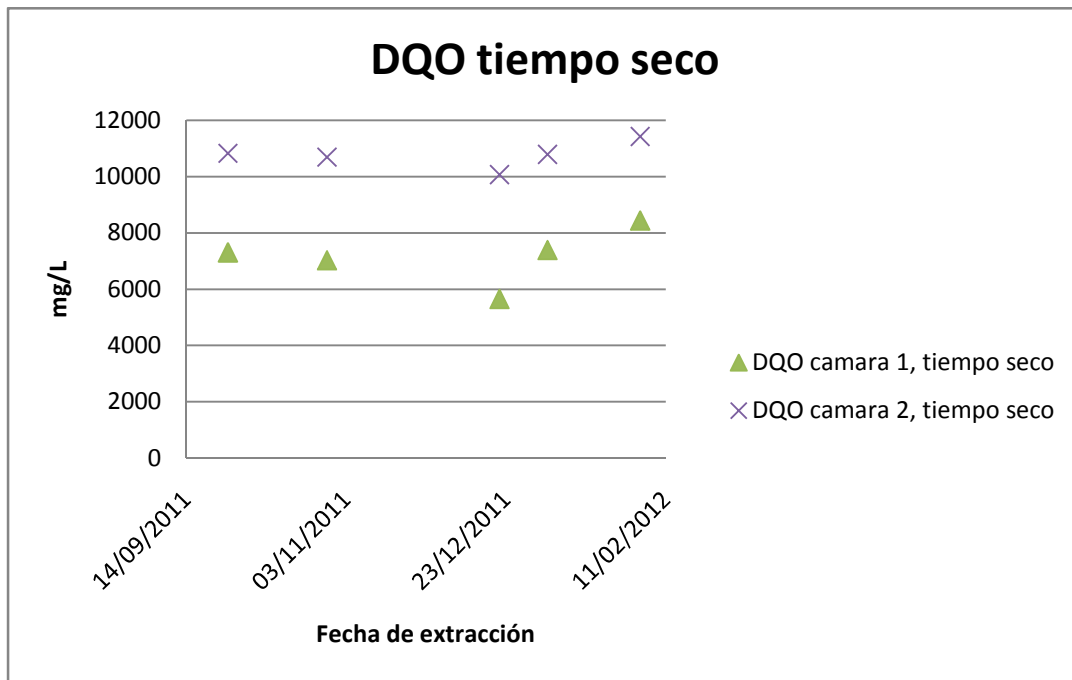
Gráficas obtenidas



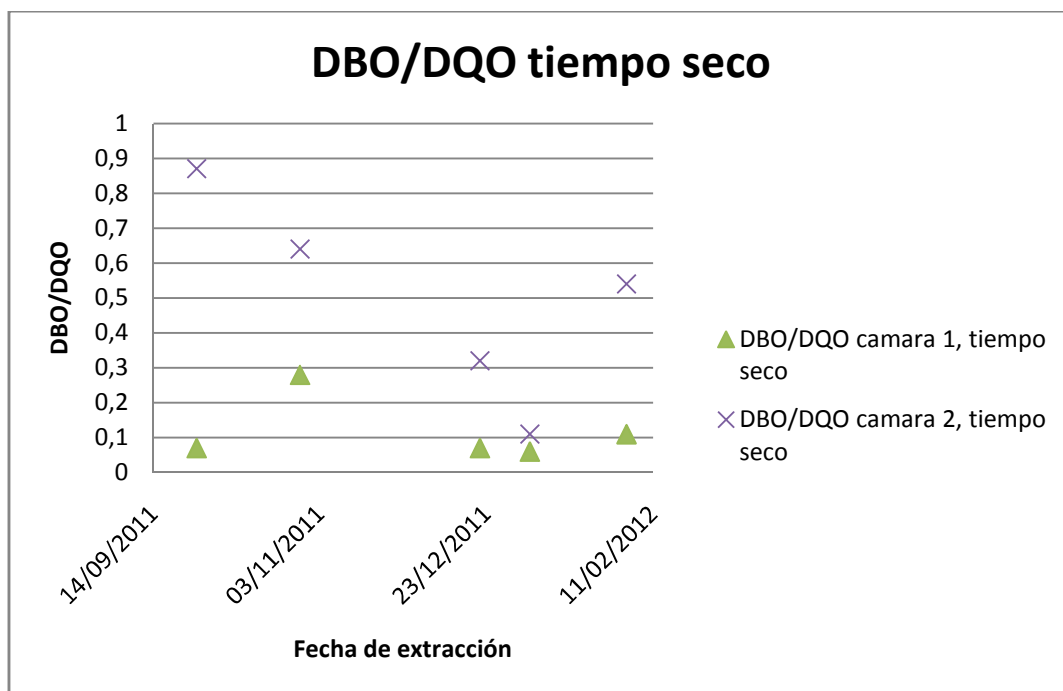
Gráfica 3-9 pH medido por Espina para tiempo seco



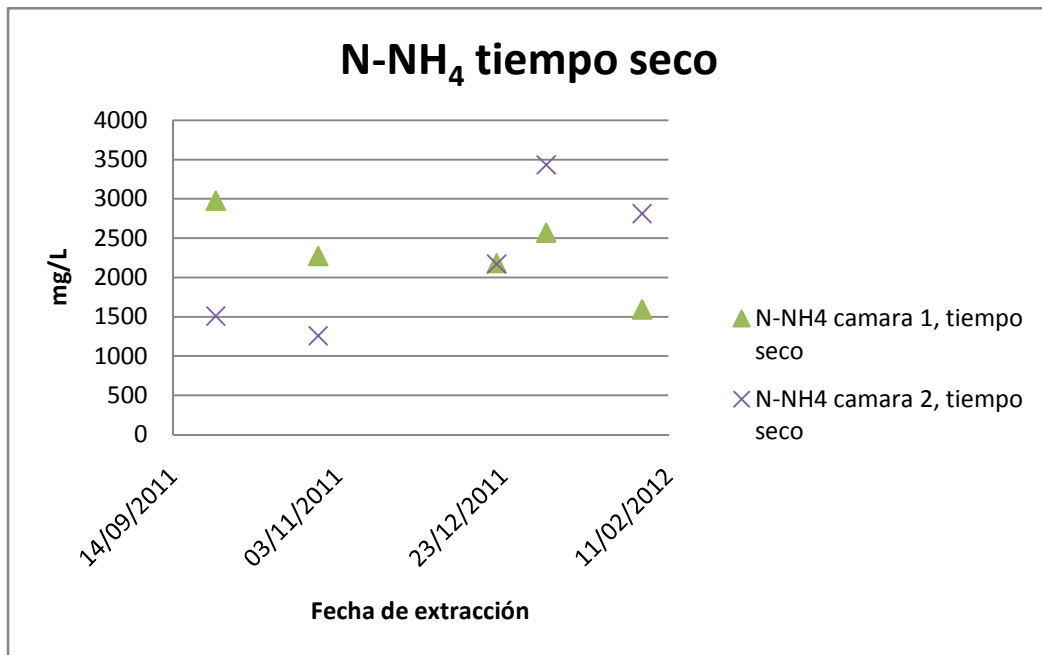
Gráfica 3-10 DBO medido por Espina para tiempo seco



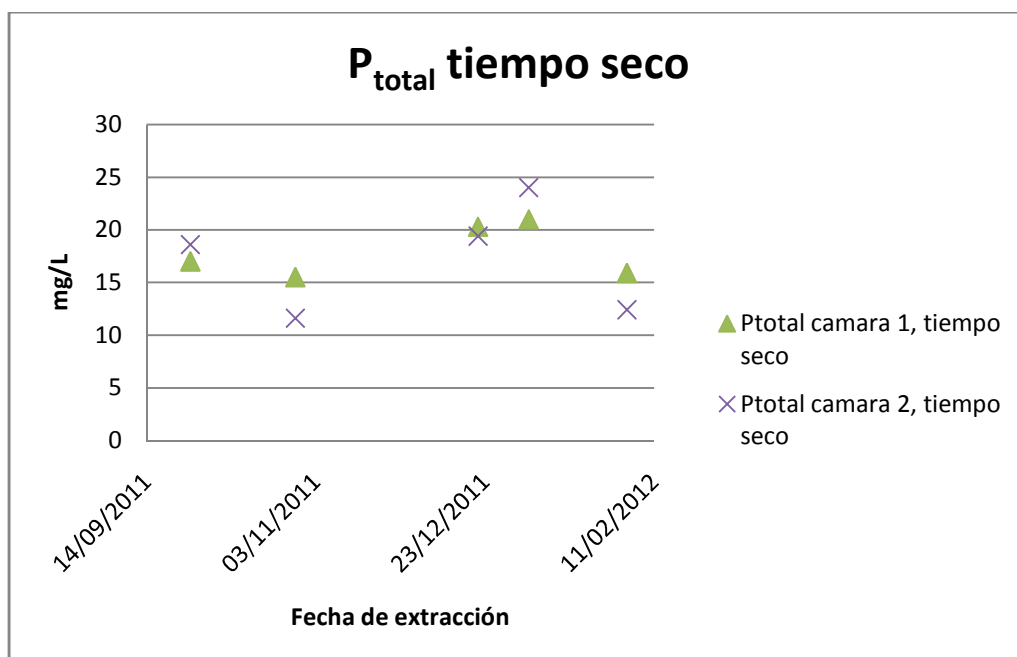
Gráfica 3-11 DQO medido por Espina para tiempo seco



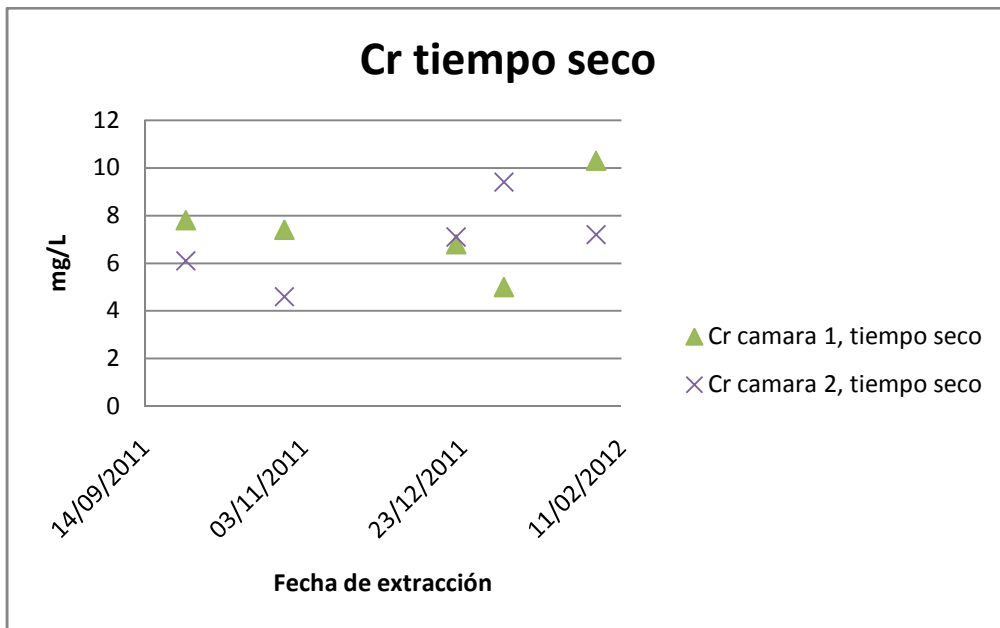
Gráfica 3-12 DBO/DQO medido por Espina para tiempo seco



Gráfica 3-13 N-NH₄ medido por Espina para tiempo seco



Gráfica 3-14 P_{total} medido por Espina para tiempo seco



Gráfica 3-15 Cr medido por Espina para tiempo seco

Análisis de datos recibidos por la empresa Espina

La cámara 2 es la más representativa del lixiviado a tratar en la planta de tratamiento. Comparando los datos de tiempo seco con los datos de presentados en la Tabla 3-1 Valores típicos de parámetros para lixiviados según se puede concluir que el lixiviado estaba en una transición de fase 3 a fase 4 a la fecha de enero 2012. Cabe esperar que a la fecha, considerando que la fase 4 dura aproximadamente un año y medio, el lixiviado proveniente de celdas C y D, y taludes internos de celdas A y B se encuentre en transición de fase 4 a fase 5.

Esta es una suposición fuerte, ya que el lixiviado está compuesto por varias edades de residuos sólidos (actualmente se continúa depositando residuos en la usina 8), por lo que no se puede concluir con exactitud el comportamiento actual ni futuro del lixiviado.

En cuanto a la relación DBO/DQO, se está frente un lixiviado biodegradable.

En la siguiente tabla se ve un resumen de las características del lixiviado de la cámara 2 en tiempo seco, y la comparación de estos valores con los establecidos en el decreto 253/79 para vertido a colector y a cursos de agua.

Parám	Máx	Mín	Prom	Máx permitido para vertido a colector	Máx permitido para vertido a cursos de agua
pH	8,7	7,8	8,2	5,5-9,0	6,0-9,0
SST (mg/L)	2808	78	1045,6	-	150
DBO (mg/L)	9390	1170	5357,6	700	60
DQO (mg/L)	11425	10070	10759,8	-	-
DBO/DQO	0,87	0,11	0,496	-	-
N-NH ₄ (mg/L)	3430	1260	2236	-	5
% N	31,8	11,79	20,736	-	-
P _{total} (mg/L)	24	11,6	17,2	-	5
% P	0,22	0,11	0,16	-	-
Cr (mg/L)	9,4	4,6	6,88	3	1
Plomo (mg/L)	0,5	0,4	0,45	0,3	0,3

Gráfica 3-16 Comparación valores cámara 2 con norma 253/79 vigente

3.2.2 Estudios de campo

Se realizaron estudios de campo para determinar características del lixiviado a la fecha de Mayo 2013. Para la realización de estos, se tuvo en cuenta el siguiente plan de muestreo.

3.2.2.1 Plan de muestreo

Puntos de muestreo

Para la elección de puntos de muestreo se realizó una recorrida por el sitio de disposición final. Se pudo observar que la "cámara 2" (Figura 2-8 Cámaras de aforo y muestreo utilizadas por Espina) estaba recibiendo el lixiviado de todas las usinas. En la siguiente imagen se observan dos tuberías de llegada. La superior (tubería azul) corresponde al lixiviado proveniente de las usinas 6, 7 y 8 (celdas A y B) que es bombeado por la empresa Aborgama, encargada del proyecto de extracción de biogás del Vertedero. La tubería inferior (tubería blanca) corresponde al lixiviado proveniente de la usina 8 (celdas C y D), que es conducido mediante drenes por gravedad hacia la cámara.



Fotografía 3-1 Fotografía de tuberías de conducción de lixiviados hacia "cámara 2"

Parámetros a medir

Los parámetros que se midieron fueron:

- Caudal
- pH
- SST
- DBO

A excepción del caudal, los demás parámetros fueron calculados en el laboratorio del Instituto de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, UDELAR.

Preparación previa al muestreo

Previo a la realización del muestreo se coordinó con el laboratorio, de modo de contar con disponibilidad por parte de ellos para la realización de estudios.

También se eligió un día de “tiempo seco”, sin eventos de lluvia en los 7 días previos al muestreo, debido a que el lugar de muestreo es difícil de acceder en clima lluvioso, y considerando que en tiempo seco el caudal medido corresponde solo a lixiviado, sin contener aguas pluviales.

Se esterilizaron frascos suficientes para realización de ensayos al lixiviado mezcla (lixiviado con aporte de todas las usinas) sin considerar la posibilidad de toma de muestras independientes. Esto fue considerado “en campo” por lo que se tomaron dos muestras de dos litros cada una, con botellas de refresco lavadas con agua potable.

Se contó con heladera para colocación de muestras y vehículo para su transporte hacia el laboratorio luego del proceso de muestreo.

Proceso de extracción de muestras

Para la toma de muestras contamos con el apoyo de personal de Espina, que contaba con el equipamiento necesario para manipular lixiviado de forma segura.

Las muestras fueron tomadas el día jueves 9 de mayo del 2013 a las 09:30 am y llevadas a laboratorio el mismo día a las 11:00 am.

Luego de extraídas las muestras, las correspondientes al lixiviado mezcla de todas las usinas fueron colocadas en una heladera con hielo, mientras que las correspondientes a las dos tuberías antes mencionadas por separado fueron colocadas en envases de 2 litros de refresco y colocadas inmediatamente en el vehículo, en un lugar fresco y sin exposición al sol, donde luego fueron transportadas hacia el laboratorio.

Para el aforo del caudal se utilizó un balde de 10 litros y se tomó el tiempo hasta su llenado. Este procedimiento fue realizado 4 veces por línea de conducción por entender la incertidumbre que el método acarrea.

En las siguientes tres imágenes se puede observar un funcionario tomando muestras de lixiviado.



Fotografía 3-2 Funcionario de Espina tomando muestra de lixiviado para pH



Fotografía 3-3 Funcionario de Espina tomando muestras del lixiviado proveniente de usinas 6,7 y 8(celdas A y B) con envase de refresco



Fotografía 3-4 Organización de muestras en heladera

3.2.2.2 Resultados obtenidos

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos en campo.

Parámetro	fecha	Mezcla (mg/L)	Usina 8CD (mg/L)	Usina 6,7 y 8AB
pH	09/05/2013	8,36	8,13	8,63
SST	09/05/2013	1724		
DBO ₅	10/05/2013	993	1024	792

Tabla 3-20 Resultados obtenidos en muestreo realizado el 9/5/2013

09/05/2013	Caudal (l/s)
Usina 8CD	1,4
Usina 6,7 y 8AB	0,5

Tabla 3-21 Resultados obtenidos en campo el 9/5/2013

3.2.2.3 Análisis de resultados obtenidos en campo

En la siguiente tabla se observan los valores de los resultados medidos en campo con los valores aportados por la IM y por la empresa ESPINA.

Parám	Fecha toma de muestras	Mezcla (mg/L)	Usina 8CD (mg/L)	Usina 6,7 y 8AB	valor prom cam 2 ESPINA	Último valor lix 7.1 IM
pH	09/05/2013	8,36	8,13	8,63	8,20	8,10
SST	09/05/2013	1724			1046	
DBO ₅	09/05/2013	993	1024	792	5358	110

Gráfica 3-17 Comparación valores medidos en campo con valores de IM y ESPINA

Como se puede observar en los resultados presentados, los valores obtenidos tienen coherencia.

El lixiviado proveniente de la usina 8, celdas C y D es un lixiviado bastante estabilizado, a diferencia del medido por espina, ya que tiene un año y medio más de antigüedad de residuos.

Al comparar los resultados medidos con los datos de lixiviado aportados por la IM se observa que éstos son menores en materia de DBO. Esto es debido a que el lixiviado 7.1 corresponde a un lixiviado totalmente estabilizado a diferencia del medido en campo, que es un lixiviado en proceso de estabilización.

3.2.3 Resumen caracterización de lixiviado

Junto con el caudal, la determinación de las características del lixiviado es una de los parámetros de diseño más complejos de alcanzar para el diseño de la planta de tratamiento de éstos.

La diferencia de comportamiento entre lixiviados de Vertederos jóvenes y viejos hace una tarea casi imposible la de determinar con exactitud a lo largo del tiempo las características que tendrá el lixiviado.

Los datos históricos del lixiviado pueden servir como guía para el diseño de la planta, pero es importante tener en cuenta que estos datos varían ampliamente con el paso del tiempo, por lo que valores obtenidos por Espina del lixiviado de la usina 8 hace un año y medio diferirán de los actuales y de los futuros.

La planta de tratamiento recibirá lixiviados de rellenos jóvenes, antiguos y medios por lo que los parámetros de diseño serán una composición de éstos tipos de rellenos.

Por otra parte, y no menor, está el hecho de que el Vertedero no dispone de tapada diaria, por lo que en tiempo seco y en tiempo de lluvia las proporciones de aporte de lixiviado de cada usina y celda serán muy diferentes, influyendo en tiempo de lluvia en gran medida el lixiviado proveniente de las celdas sin tapar, y en tiempo seco en proporciones más equilibradas, lo que implica una carga de llegada a la planta de tratamiento muy diferente.

En las siguientes planillas se pueden observar los parámetros de caracterización resumen de IM, Espina, obtenidos en campo, y los que se utilizarán para el diseño de la planta de tratamiento.

Cam 2 t. seco (representativo usina 8 celdas C y D) ESPINA			
Parámetro	Máximo	Mínimo	Promedio
pH	8,7	7,8	8,2
SST (mg/L)	2808	78	1045
DBO (mg/L)	9390	1170	5357
DQO (mg/L)	11425	10070	10759
DBO/ DQO	0,87	0,11	0,50
N-NH ₄ (mg/L)	3430	1260	2236
P _{total} (mg/L)	24,0	11,6	17,2
Cr (mg/L)	9,4	4,6	6,9
Plomo (mg/L)	0,5	0,4	0,5

Tabla 3-22 Valores de parámetros representativos de usina 8 celdas C y D. (ESPINA)

Cam 1 t. seco (representativo usina 8 celdas A y B) ESPINA			
Parámetro	Máximo	Mínimo	Promedio
pH	8,8	8,2	8,5
SST (mg/L)	2440	74	796
DBO (mg/L)	1932	400	841
DQO (mg/L)	8436	5653	7161
DBO/ DQO	0,28	0,06	0,12
N-NH ₄ (mg/L)	2976	1590	2317
P _{total} (mg/L)	21	15,5	17,9
Cr (mg/L)	10,3	5	7,5
Plomo (mg/L)	0,6	0,4	0,5

Tabla 3-23 Valores de parámetros representativos de usina 8 celdas A y B. (ESPINA)

lix 7.1 (representativo usinas 6 y 7) IM		
Fecha	Parámetro	Valor
29/10/2010	pH	8,1
29/10/2010	DBO (mg/L)	110
29/10/2010	DQO (mg/L)	1700
29/10/2010	N-NH ₃ (mg/L)	960
29/10/2010	P _{total} (mg/L)	8,6
29/10/2010	Cr (mg/L)	0,9

Tabla 3-24 Valores de parámetros representativos de usinas 6 y 7 (IM)

Usinas 6 y 7. Final 2011 ESPINA	
Parámetro	Promedio
pH	7,6
SST (mg/ L)	1227
DBO (mg/ L)	464
DQO (mg/ L)	4548
(DBO/ DQO)	0,1
N-NH ₄ (mg/ L)	3760
(N-NH ₄ / DQO) (%)	82,7
P _{total} (mg/ L)	33,3
(P/ DQO) (%)	0,7
Cr (mg/ L)	3,4
Plomo (mg/ L)	0,5

Tabla 3-25 Valores de parámetros representativos de usinas 6 y 7 (ESPINA)

Muestra en campo Mayo 2013				
Parámetro	fecha	Mezcla (mg/L)	Usina 8CD (mg/L)	Usina 6,7 y 8AB
pH	09/05/2013	8,36	8,13	8,63
SST	09/05/2013	1724		
DBO ₅	10/05/2013	993	1024	792

Tabla 3-26 Valores de parámetros representativos de usinas 6, 7 y 8 (Medidos en campo)

3.2.3.1 Valores de parámetros adoptados para el diseño de la planta de tratamiento

Parámetro	Diseño mínimo	Diseño máximo	Diseño esperado	253/79 vertido a colector	% necesario remoción
pH	7,0	9,0	8,3	5,5-9,5	-
SST (mg/L)	1400	2800	2000	-	-
DBO (mg/L)	800	10000	4000	700	82,5
DQO (mg/L)	1000	20000	10000	-	-
DBO/ DQO	0,1	0,5	0,4	-	-
N-NH ₄ (mg/L)	1500	4000	2500	-	-
P _{total} (mg/L)	15	25	18	-	-
Cr (mg/L)	7,0	7,5	7,5	3,0	60
Plomo (mg/L)	0,45	0,5	0,5	0,3	40

Tabla 3-27 Valores de parámetros adoptados para el diseño de la planta de tratamiento

4 Bibliografía

1. **Espina.** *Informe final de determinación de caudales y caracterización del lixiviado.* Montevideo : s.n., 2012.
2. **PROSAB.** *Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras.*
3. **George Tchobanoglous, Hilary Theisen, Samuel A.Vigil.** *Gestion Integral de Residuos Sólidos, Volumen I.* s.l. : Mc Graw Hill.
4. **Borzacconi, Liliana, y otros.** *Estimación de la Producción de Biogás en un Relleno Sanitario.* Montevideo : s.n.
5. **Kok, Pablo y D'Angelo, Mauro.** *Estudio de Valorización de residuos sólidos domiciliarios (RSD) en la ciudad de Montevideo, Uruguay.* Montevideo : s.n., 2012.
6. *Landfill Site Design, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, IRELAND.*
7. **DINASA.** *Diseño de Sistemas de Aguas Pluviales Urbanas.* Montevideo : s.n., 2009.