

UCH-FC  
B. Ambiental  
Q542  
C1

FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



**ANÁLISIS DE ALGUNAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS Y  
BIOLÓGICAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE DOS  
RELLENOS SANITARIOS.**

Seminario de Título

Entregado a la

Universidad de Chile

en cumplimiento parcial de los requisitos

para optar al Título de

Bióloga con mención en Medio Ambiente.



**KARINA GENOVEVA DÍAZ GARCÍA**

Marzo, 2010  
Santiago - Chile

Director de Seminario de Título: Sra. María Teresa Varnero Moreno



## “ANÁLISIS DE VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS DE DOS RELLENOS SANITARIOS”

**Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Biólogo con mención en Medio Ambiente.**

***KARINA GENOVEVA DIAZ GARCIA***

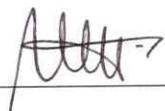
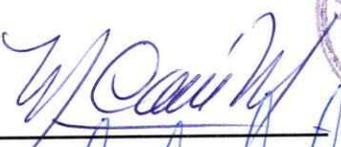
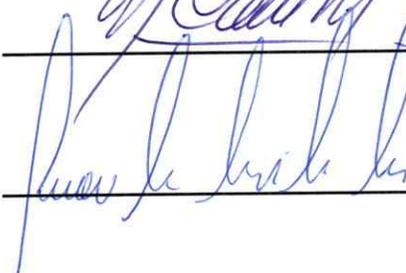
*Sra. Maria Teresa Varnero Moreno*  
Director Seminario de Título

*Dr. Margarita Caru Marambio*  
Co-Directora

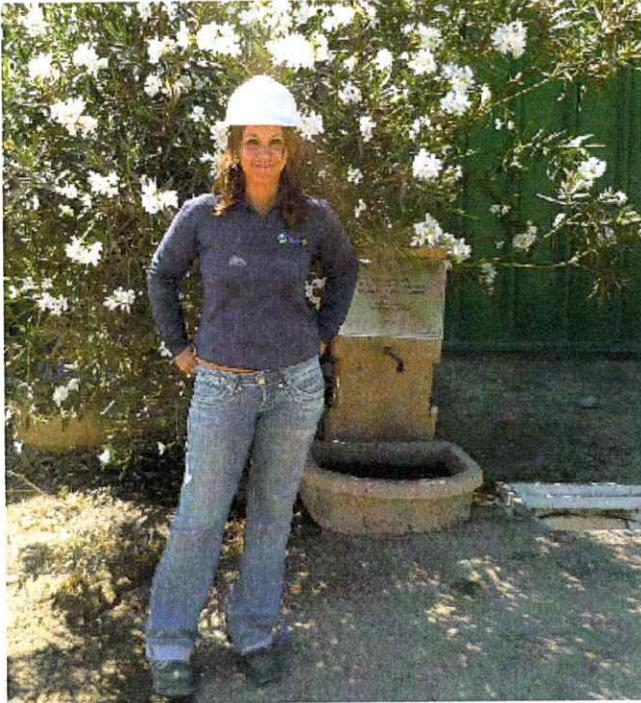
Comisión de Evaluación Seminario de Título

***Dra Margarita Carú***  
Presidente Comisión

***Sr. Juan Manuel Uribe***  
Corrector


Santiago de Chile, Marzo de 2010.



Nací en Santiago un día 26 de  
Febrero de 1980.



Mi niñez transcurrió alegre y feliz.

Mis valores familiares se unieron con la educación en el movimiento de guías y scout, ambos base sólida de mi vida actual.

Desde que comencé mis primeras aventuras y campamentos al aire libre me di cuenta del gran interés que tenía

por la naturaleza, pero al mismo tiempo me conmovían causas sociales, lo cual me llevó a querer estudiar Terapia Ocupacional casi ciegamente. Sin embargo, por más intentos que pretendí, el destino me mostró otro camino y decidí que finalmente el amor a la naturaleza guiaría mis nuevos horizontes. Así comenzó una gran búsqueda, pero siempre en mi gran universidad. Mis primeros intentos fueron estudiando Ingeniería Forestal, luego Química Ambiental, pero no eran lo que buscaba, finalmente una carrera hermana de la anterior; Biología Ambiental, logró despertar grandes pasiones en mí. Dicen por ahí que la perseverancia es la antesala del triunfo... el camino no fue fácil, la montaña que subí tenía muchas rocas en el camino y gran pendiente, pero siempre tuve grandes personas que me dieron una mano para seguir avanzando, hasta que hoy por fin cumplí uno de mis sueños y proyectos, ser un profesional ambiental. Darle vida a los sueños implica esfuerzo, sacrificio, pasión y entrega total, pero por sobre todo creer que se puede, ser valiente combatiendo los temores y las incertidumbres, solo así se hacen realidad.

Hoy, mi compromiso es contribuir y ser parte de un gran sueño de todos quienes sentimos que podemos hacer algo para mejorar nuestro planeta.

**“El verdadero viaje de  
descubrimiento no es buscar  
nuevas tierras, sino ver con  
nuevos ojos”  
Marcel Proust**

**A mis padres,  
Y por sobre todo al resplandor de mi vida, mi hijo Paulo.**



## AGRADECIMIENTOS

Muy Agradecida por la gran oportunidad que me brindó el altísimo gran espíritu y todas las fuerzas y energías de la tierra para que los caminos se presentaran en mi vida y me llevaran a conocer a dos grandes personas que me guiaron y son parte de este trabajo; mi profesora María Teresa Varnero y José Acevedo.

A todas las personas que colaboraron en llevar a cabo los estudios realizados en Relleno Santa Marta y ex Vertedero Lepanto.

A Fanny Contreras quien me apoyó en forma incondicional y con gran compromiso desde mis comienzos en la Universidad.

A mis padres y hermanos por su cariño y motivación, y a mis amigas (os) por su incondicional apoyo, entrega de fuerzas y constante motivación por seguir adelante.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS



|  |      |
|--|------|
| INDICE DE TABLAS.....  | vii  |
| INDICE DE FIGURAS.....   | viii |
| LISTA DE ABREVIATURAS.....   | ix   |
| RESUMEN.....   | x    |
| ABSTRACTS.....   | xii  |
| <br>   |      |
| I. INTRODUCCIÓN.....   | 1    |
| 1.1 Hipótesis.....   | 10   |
| 1.2 Objetivo general.....  | 10   |
| 1.2.1 Objetivos Específicos.....                                   | 10   |
| <br>   |      |
| II. MATERIALES Y METODOS.....                                      | 11   |
| 2.1 Sitio de Estudio.....  | 11   |
| 2.2 Análisis y colecta de la muestra de lixiviados.....            | 12   |
| 2.3 Análisis y colecta de residuos degradados.....                 | 14   |
| 2.4 Vaciamiento del lixiviado en pozo de ex Vertedero Lepanto..... | 16   |
| 2.5 Análisis fisicoquímicos de los Lixiviados.....                 | 16   |
| 2.5.1 Temperatura.....   | 16   |
| 2.5.2 Demanda Química de Oxígeno.....                              | 17   |
| 2.5.3 Cloruros.....  | 18   |
| 2.5.4 Conductividad Eléctrica.....                                 | 18   |
| 2.5.5 Sólidos Suspendedos Totales.....                             | 18   |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.5.6 Determinación de pH.....                                       | 19        |
| 2.6 Análisis de Residuos sólidos degradados.....                     | 19        |
| 2.6.1 Humedad.....   | 19        |
| 2.6.2 Materia Orgánica.....  | 19        |
| 2.6.3 Determinación Actividad Respiratoria.....                      | 20        |
| 2.7 Análisis Estadístico.....  | 21        |
| <br>   |           |
| <b>III. RESULTADOS.....</b>  | <b>22</b> |
| 3.1 Análisis Fisicoquímicos de los lixiviados.....                   | 22        |
| 3.1.1 Temperatura y pH.....  | 23        |
| 3.1.2 Degradabilidad.....  | 24        |
| 3.2 Producción de biogás.....  | 26        |
| 3.2.1 Datos en cada Relleno Sanitario.....                           | 32        |
| 3.3 Vaciamiento de lixiviados a un pozo en ex Vertedero Lepanto..... | 35        |
| 3.4 Materia Orgánica en los Residuos Sólidos.....                    | 36        |
| 3.5 Determinación de la Actividad Respiratoria.....                  | 41        |
| <br>   |           |
| <b>IV. DISCUSION.....</b>  | <b>43</b> |
| 4.1 Análisis Fisicoquímicos.....                                     | 43        |
| 4.1.1 Temperatura y pH.....  | 43        |
| 4.1.2 Degradabilidad.....  | 45        |
| 4.2 Producción de biogás.....  | 45        |
| 4.3 Análisis degradación Materia Orgánica.....                       | 49        |
| 4.4 Determinación de la Actividad Respiratoria.....                  | 51        |



V. CONCLUSIONES.....52

VI. BIBLIOGRAFIA.....53

ANEXOS

I. Análisis Estadísticos.....56



## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1</b> Características del lixiviado según la edad del Relleno Sanitario.....  | 6  |
| <b>Tabla 2</b> Variaciones en la composición de los lixiviados para las distintas fases de degradabilidad.....                           | 6  |
| <b>Tabla 3</b> Datos de los resultados promedios obtenidos para los análisis fisicoquímicos efectuados en ambos Rellenos Sanitarios..... | 26 |
| <b>Tabla 4</b> Correlaciones entre las diferentes variables analizadas y el flujo de biogás.....   | 27 |
| <b>Tabla 5</b> Resumen del modelo de Regresión lineal.....   | 28 |
| <b>Tabla 6</b> Significancias de las variables en el modelo de regresión lineal.....   | 29 |
| <b>Tabla 7</b> Comparación de medias para ambos Rellenos Sanitarios.....   | 31 |
| <b>Tabla 8</b> Prueba de reacciones extremas de Moses.....   | 32 |
| <b>Tabla 9</b> Análisis de media entre pozos de ex Vertedero Lepanto.....  | 33 |
| <b>Tabla 10</b> Análisis de media de los pozos para Relleno Sanitario Santa Marta.....   | 34 |
| <b>Tabla 11</b> Variación de algunas características del lixiviado realizadas en vaciamiento de pozo prueba.....                         | 35 |
| <b>Tabla 12</b> Concentración de metano en pozo prueba.....  | 36 |
| <b>Tabla 13</b> Datos de análisis realizados a calicata 3 en RSSM.....   | 39 |



## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> Composición de RSD en la Región Metropolitana.....  | 2  |
| <b>Figura 2</b> Esquema de las reacciones de degradación anaerobia de materia orgánica...                     | 3  |
| <b>Figura 3</b> Evolución de la composición del biogás generado por una misma capa de residuos.....           | 8  |
| <b>Figura 4</b> Pozos de captación de biogás, para toma de muestras de lixiviado en ex Vertedero Lepanto..... | 13 |
| <b>Figura 5</b> Toma de muestras de lixiviados en Relleno Sanitarios Santa Marta.....                         | 13 |
| <b>Figura 6</b> Calicatas realizadas en ambos Rellenos Sanitarios.....  | 14 |
| <b>Figura 7</b> Residuos degradados sacados de la calicata realizada en Relleno Sanitario Santa Marta.....    | 15 |
| <b>Figura 8</b> Equipos utilizados para determinación de DQO.....   | 17 |
| <b>Figura 9</b> Temperatura y pH en lixiviados de Relleno Sanitario Santa Marta.....                          | 22 |
| <b>Figura 10</b> Temperatura y pH en lixiviados de ex vertedero Lepanto.....                                  | 23 |
| <b>Figura 11</b> Degradabilidad en los lixiviados de R.S.S.M.....   | 24 |
| <b>Figura 12</b> Degradabilidad en lixiviados de ex vertedero Lepanto.....                                    | 25 |
| <b>Figura 13</b> Gráfico de probabilidad-probabilidad de la regresión lineal.....                             | 30 |
| <b>Figura 14</b> Resultado Análisis Residuos degradados Relleno Sanitario Santa Marta...                      | 37 |
| <b>Figura 15</b> Regresión porcentaje materia orgánica y humedad en R.S. Santa Marta...                       | 38 |
| <b>Figura 16</b> Resultados Análisis Residuos Degradados Relleno Sanitario Lepanto.....                       | 40 |
| <b>Figura 17</b> Comparación desprendimiento de CO2 en ambos Rellenos Sanitarios.....                         | 42 |



## LISTA DE ABREVIATURAS

AGRIMED: Centro de Agricultura y Medio Ambiente

CE: Conductividad Eléctrica

C/N: Carbono/Nitrógeno

DBO<sub>5</sub>: Demanda Biológica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

MO: Materia Orgánica

N: Nitrógeno

P: Fósforo

PTL: Planta de tratamiento de lixiviados

R.S: Relleno Sanitario

RSD: Residuos Sólidos Domiciliarios

RSSM: Relleno Sanitario Santa Marta

SST: Sólidos Suspendidos Totales

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles

## RESUMEN

La biodegradación de la materia orgánica, contenida en residuos sólidos domiciliarios, es una variable que incide en la descomposición de la basura del Relleno Sanitario y por ende, influye en la cantidad y calidad del Biogás producido. Por este motivo es interesante conocer cómo se relaciona el volumen de lixiviado con la producción de Biogás. Para lo cual es necesario analizar distintos parámetros fisicoquímicos y biológicos del lixiviado y de los residuos degradados al interior del Relleno Sanitario.

El objetivo de este estudio fue estimar el potencial de producción de biogás y comparar la eficiencia de la actividad microbiana en la descomposición anaeróbica que se produce al conceptuar un Relleno Sanitario como un reactor bioquímico natural.

La investigación se llevó a cabo utilizando lixiviado y residuos generados en dos Rellenos Sanitarios: Santa Marta, Relleno Sanitario activo, es decir que recibe en forma continua residuos domiciliarios; y en el ex Vertedero Lepanto, que se encuentra en etapa de cierre, ya que dejó de recibir residuos en el año 2002.

Los estudios se efectuaron en 8 pozos de captación de Biogás de cada Relleno Sanitario, donde se tomaron muestras de lixiviados, a las cuales se les realizó una caracterización de ciertos parámetros fisicoquímicos y biológicos. Además se determinó, mediante desprendimiento de CO<sub>2</sub>, la actividad microbiana de tres

muestras de residuos en diferentes estados de degradación para cada uno de los Rellenos Sanitarios.

En torno a esto, los resultados señalaron que ciertos parámetros como DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, SSV y la relación DBO/DQO, pH y temperatura comprendidos en el lixiviado, pueden evidenciar una correlación significativa en el potencial de producción de biogás.

La actividad biológica global presenta diferencias significativas entre ambos Rellenos Sanitarios. El potencial de producción de biogás es notoriamente más alto en Relleno Sanitario Santa Marta, pues está en constante recepción de nuevos residuos para degradar. Sin embargo, en ex vertedero Lepanto aún existe materia por degradar, la que se puede acelerar al aumentar la humedad en zonas que lo necesitan y al sacar lixiviados en zonas saturadas para aumentar la zona de succión dentro de cada pozo de captación de biogás.

Palabras claves: Lixiviados, Residuos Sólidos Domiciliarios, Vertederos, Relleno Sanitario.

## ABSTRACT

The biodegradation of organic matter contained in household solid waste is a variable that affects the decomposition of waste within in the landfill, and can therefore influence the potencial of biogas. For this reason is very helpful to know how relates the leachate with the productions of biogas, from which were analyzed various physicochemical and biological parameters of the leachate and of the waste degraded to inside of landfill.

The aim of this investigation is to estimate the potencial of biogas production and compare the efficiency of microbiological activity in the anaerobic decomposition that occurs in conceptualizing a landfill as a natural biochemical reactor.

The investigation was carried out using leachate and waste generated in two landfill: Santa Marta, Landfill active, ie continuously receives household waste; and ex Landfill Lepanto, found in close phase, because it left receiving waste in 2002.

Studies were performed in 8 wells catchment of biogas of each landfill, taking leachate sampling, to which was performed a characterization of some physicochemical and biological parameters. In addition, was determined, by detachment  $\text{CO}_2$ , the microbiological activity of three samples of waste at different stages of degradation for each of the landfills.

Around this, the results indicated that certain parameters such as  $DBO_5$ , DQO, SST, SSV and the ratio  $DBO/DQO$ , pH and temperature within the leachate may show a significant correlation in the potencial of biogas production.

The total biological activity differ significantly between the two landfills. The potencial for biogas production is notoriously highest in landfill Santa Marta, as it is constantly receiving new waste for degrade. However, in ex landfill lepanto still there is matter to degrade, which can be accelerated by increasing the humidity in areas that need it and take out leachate in saturated areas to increase the suction area within each capture well of biogas.

# I. INTRODUCCION

## RELLENOS SANITARIOS, RESIDUOS DOMICILIARIOS Y DEGRADACIÓN ANAEROBICA

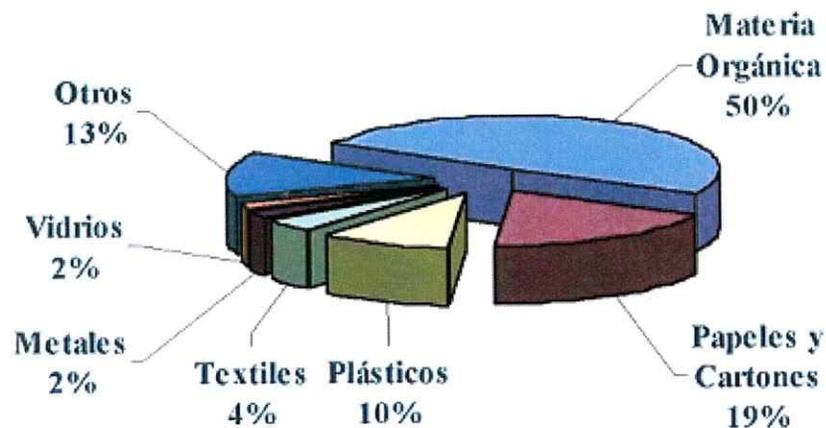
En términos formales, según la CEPIS (2002), un Relleno Sanitario es un método de disposición de los residuos sólidos en el suelo que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de su clausura, utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica.

Un Relleno Sanitario se puede conceptualizar como un reactor bioquímico con residuos y agua como entradas principales, y con gases del relleno y lixiviado como principales salidas (Tchobanoglus, et al 1994).

La actividad de los microorganismos anaerobios debe tener lugar en un medio acuoso, donde se disuelvan los compuestos orgánicos antes de ser metabolizados. Sin duda, el lixiviado constituye además el canal a través del cual los microorganismos responsables de la generación del biogás colonizan todas las zonas del vertido.

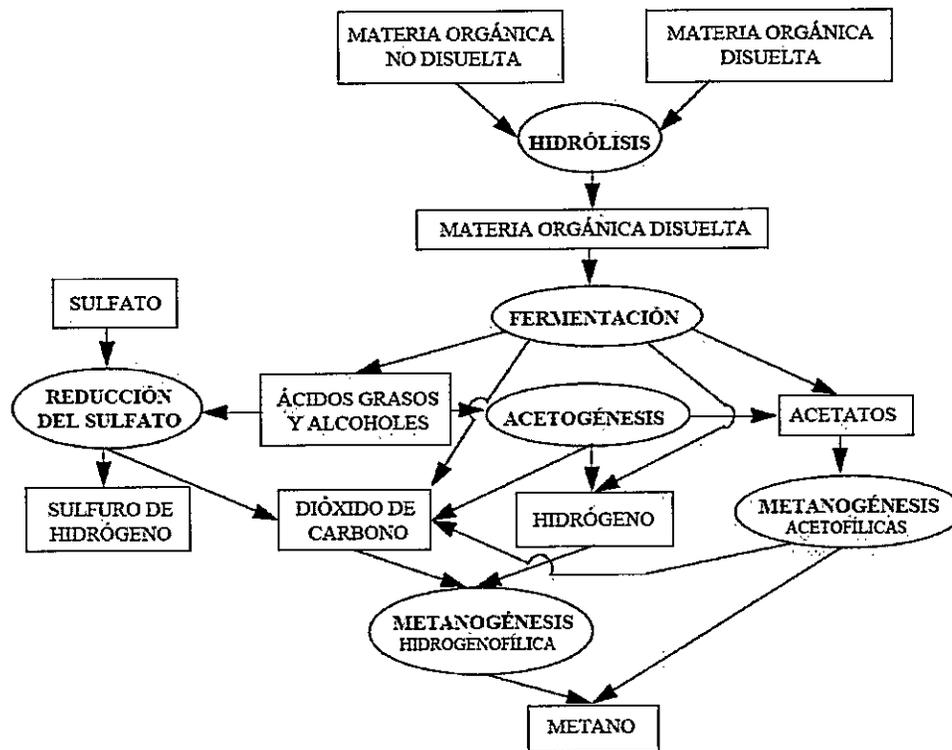
La producción de biogás es un proceso de fermentación o digestión anaeróbica. Una parte del carbono se oxida completamente formando  $\text{CO}_2$  y la otra se reduce en alto grado para formar  $\text{CH}_4$ .

De acuerdo a estudios realizados de composición de residuos sólidos domiciliarios en la Región Metropolitana (Figura 1), alrededor del 50% está compuesto por residuos orgánicos que contienen un alto porcentaje de materia orgánica (factible de degradar rápidamente) y aproximadamente un 20% está compuesto de otros materiales que pueden ser reciclados. (CONAMA, 1997)



**Figura 1.** Composición de RSD en la Región Metropolitana (CONAMA, 1997).

La descomposición de la materia orgánica compleja suele describirse como una serie de etapas de degradación anaeróbica. Se han propuesto varias teorías que incluyen distinto número de etapas de descomposición. Una de las más extendidas es la que se resumen en la Figura 2.



**Figura 2.** Esquema de las reacciones de degradación anaerobia de materia orgánica.

Adaptado de Zehnder , 1982, Gujer y Zehnder, 1983 y Zinder, 1984.

**1ª Etapa.** Los compuestos orgánicos son HIDROLIZADOS y FERMENTADOS a ácidos grasos, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. La hidrólisis es el paso crítico del proceso, que limita la velocidad de degradación de los residuos y la generación de metano, pues los microorganismos necesitan que sus nutrientes estén disueltos en agua para actuar. Esta etapa es llevada a cabo por bacterias fermentativas que generan enzimas extra-celulares. Estas bacterias son un grupo amplio y heterogéneo, que incluye bacterias anaerobias estrictas y bacterias anaerobias facultativas.

**2ª Etapa.** Las bacterias ACETOGÉNICAS son responsables de la segunda etapa, ellas generan ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono cuando el ácido graso volátil que consumen contiene un número impar de átomos de carbono. Estas bacterias pueden también consumir compuestos aromáticos que contengan oxígeno (p.ej., ácido benzoico y fenoles), pero no hidrocarburos aromáticos (p.ej. benceno y tolueno).

**3ª Etapa.** Corresponde a la producción de metano realizada por un grupo especializado de bacterias denominadas METANOGÉNICAS. Estas bacterias son obligatoriamente anaerobias y requieren potenciales REDOX muy bajos. Un grupo de ellas, las hidrogenofílicas, convierten hidrógeno y dióxido de carbono en metano, mientras que otro grupo, las acetofílicas, convierten principalmente ácido acético en metano y dióxido de carbono. Las bacterias metanogénicas también pueden convertir ácido fórmico y metanol a metano. La conversión de ácido acético en metano es considerada la fuente más importante de metano.

## LIXIVIADOS Y BIOGÁS

La degradación anaerobia de la materia orgánica contenida en los Residuos Sólidos Domiciliarios sólo se produce, cuando los compuestos orgánicos que la constituyen están disueltos en agua. Por ello, existe una íntima relación entre el lixiviado producido en un vertedero y la generación de biogás. Los líquidos lixiviados se forman mediante el percolado de líquidos a través de sustancias en proceso de descomposición de la basura. El líquido, al fluir, disuelve algunas sustancias y arrastra partículas con otros compuestos químicos. Los ácidos orgánicos formados en ciertas etapas de la descomposición, comprendidos en el lixiviado (como ácido acético, láctico o fórmico), disuelven los metales contenidos en los residuos, transportándolos con el lixiviado. La composición fisicoquímica de los lixiviados varía mucho de acuerdo al tipo de residuos, las precipitaciones en el área, las velocidades de descomposición química u otras condiciones del lugar (Parra, 1991). Estas variaciones cambian de acuerdo a la edad del Relleno Sanitario (Tabla 1), a la distinta constitución de los residuos vertidos y a la etapa o fase de la degradación de los mismos (Tabla 2).

Lixiviados jóvenes, de entre 2 y 5 años de antigüedad, se caracterizan por una alta relación entre la Demanda Bioquímica de Oxígeno y la Demanda Química de Oxígeno ( $DBO_5/DQO > 0,3$ ); un bajo pH (menor a 6,5); una alta carga orgánica, debida a los ácidos grasos volátiles; y una baja concentración de metales pesados. En lixiviados viejos, la relación  $DBO_5/DQO$ , que indica la biodegradabilidad del lixiviado, es menor de 0,1; el pH es mayor de 7,5; y la carga orgánica desciende debido a la ausencia de ácidos grasos volátiles.

**Tabla 1.** Características del lixiviado según la edad del Relleno Sanitario.

| Parámetro (mg/L)     | Edad del generado en el relleno sanitario (años) |               |             |        |
|----------------------|--|---------------|-------------|--------|
|                      | 0-5  | 5-10          | 10-20       | >20    |
| DBO5(1)              | 10.000-25.000                                    | 1.000-4.000   | 50-1.000    | <50    |
| DQO(2)               | 15.000-40.000                                    | 10.000-20.000 | 1.000-5.000 | <1.000 |
| Nitrógeno (Kjeldahl) | 1.000-3.000                                      | 400-600       | 75-300      | <50    |
| Nitrógeno (amonio)   | 500-1.500  | 300-500       | 50-200      | <30    |
| SDT(3)               | 10.000-25.000                                    | 5.000-10.000  | 2.000-5.000 | <1.000 |
| pH                   | 3-6  | 6-7           | 7-7,5       | 7,5    |
| Calcio               | 2.000-4.000                                      | 500-2.000     | 300-500     | <300   |
| Sodio y Potasio      | 2.000-4.000                                      | 500-1.500     | 100-500     | <100   |
| Magnesio y Aluminio  | 500-1.500  | 500-1.000     | 100-500     | <100   |
| Zinc y Aluminio      | 100-200  | 50-100        | 10-50       | <10    |
| Cloruro              | 1.000-3.000                                      | 500-2.000     | 100-500     | <100   |
| Sulfato              | 500-2.000  | 200-1.000     | 50-200      | <50    |
| Fósforo              | 100-200  | 10-100        |             | <10    |

(1) Demanda bioquímica de oxígeno; (2) Demanda química de oxígeno; (3) Sólidos disueltos totales.

Fuente: (El-Fadel, M. et al ,1997).

**Tabla 2.** Variaciones en la composición de los lixiviados para las distintas fases de degradabilidad (determinada como la relación DBO/DQO presente en el lixiviado).

| Fase     | pH        | DBO/DQO   |
|----------|-----------|-----------|
| FASE I   | < 6,5     | > 0,3     |
| FASE II  | 6,5 a 7,5 | 0,1 a 0,3 |
| FASE III | > 7,5     | < 0,1     |

Fuente: Gendebien et al. (1992).

La producción de biogás depende del contenido en materia orgánica y del origen de ésta; todos los componentes de los residuos sólidos domiciliarios se degradan anaeróbicamente a diferentes tasas. Por ejemplo, los alimentos se descomponen más rápido que los productos de papel; aunque el cuero, la goma y algunos plásticos también son materias orgánicas, usualmente se resisten a la biodegradación. Algunos materiales lignocelulósicos, plásticos, textiles y otras materias orgánicas son muy resistentes a la descomposición vía organismos anaeróbicos (Soto, 1985).

El resultado final de la degradación anaerobia de la materia orgánica es la generación de biogás cuya cantidad y composición es variable con el tiempo (generalmente compuesto de 60% CH<sub>4</sub> - 40% CO<sub>2</sub>). Si se sigue el proceso de descomposición, a través de las emisiones de gases, pueden distinguirse cuatro fases que describen esta descomposición (Figura 3).

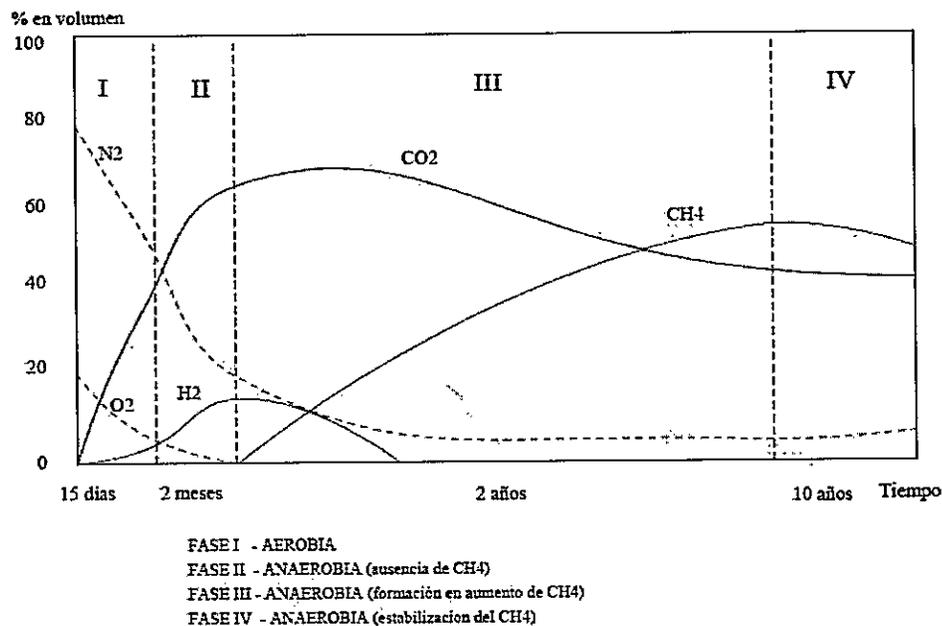
**Fase I.** Breve degradación anaerobia. El oxígeno retenido en los residuos recién depositados se consume rápidamente, produciéndose compost y dióxido de carbono a partir de la materia orgánica fácilmente degradable.

**Fase II.** Bacterias fermentativas y acidogénicas producen, bajo condiciones anaerobias, ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono e hidrógeno. La presencia de estos gases reduce el porcentaje relativo de nitrógeno.

**Fase III.** Segunda fase anaerobia, en la que actúan las bacterias metanogénicas produciendo metano. Dióxido de carbono e hidrógeno disminuyen en proporción relativa.

**Fase IV.** Se estabiliza la metanogénesis. 50-60% de metano y bajos niveles de hidrógeno. El dióxido de carbono es reducido en parte a metano.

Otros autores establecen solo tres fases, realizado un ajuste a las condiciones anaerobias establecen una fase "ácida" (fusionando fase I y II), una "metanogénica" (fase III) y una fase de "maduración" final (fase IV).



**Figura 3.** Evolución en el tiempo de la composición del biogás generado por una misma capa de residuos. Se pueden distinguir cuatro fases de acuerdo con el proceso de degradación; Fase de "ajuste inicial" (I y II), "ácida" (III), "metanogénica" (IV).

Fuente: Tchobanoglous et al., 1994.

La duración de cada fase depende de múltiples factores: ambientales, gestión del vertedero, tratamiento de los residuos, etc.

## ACTIVIDAD MICROBIOLÓGICA

La cantidad del  $\text{CO}_2$  producido es una medida de la actividad biológica del sistema, también puede ser considerada como indicador del nivel energético de un medio (Varnero, 1990). Durante las etapas iniciales de la descomposición de los materiales orgánicos, hay un rápido aumento en el número de organismos heterótrofos, acompañado de la emisión de grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  (Tisdale y Nelson, 1970).

La tasa de respiración puede ser evaluada a través de la cantidad de  $\text{CO}_2$  producido en un sustrato húmedo. Para ello, un suelo húmedo se incuba por un tiempo definido en una solución de NaOH, la cantidad de NaOH que permanece después de la incubación es determinada por titulación con un ácido estandarizado (Rowe, 1994).

La medición de la respiración del sustrato es uno de los métodos más utilizados para evaluar la actividad microbiológica. Considera la utilización de la MO lábil por una parte de la microbiota autóctona, liberando la fracción lábil de carbono desde ésta. (Haynes, 2005).

## **1.1 Hipótesis**

A mayor contenido de materia orgánica biodegradable disponible, en condiciones anaeróbicas, se generaría mayor producción de biogás.

Rellenos en etapa de cierre dispondrían de menor contenido de materia orgánica lábil, lo que implica baja producción de biogás.

## **1.2 Objetivo General**

Estimar el “potencial” de producción de biogás de un Relleno Sanitario.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

- Determinar parámetros fisicoquímicos de referencia que permitan caracterizar el lixiviado de un Relleno Sanitario en funcionamiento activo respecto de otro en fase de cierre.
- Evaluar la actividad microbiológica de cada Relleno Sanitario para estimar el potencial de producción de biogás.

## II. MATERIALES Y METODOS

### 2.1 Sitio de Estudio

El estudio de lixiviados y residuos degradados se realizó en el ex Vertedero Lepanto y en el Relleno Sanitario Santa Marta.

El ex vertedero Lepanto se ubica en la Región Metropolitana, Provincia Maipo, ciudad de Santiago, comuna de San Bernardo. La superficie del terreno donde se emplaza el proyecto corresponde a 34 hectáreas considerando zonas de corona y taludes de las etapas I y II del antiguo Vertedero Zona Sur de Santiago. La etapa I corresponde a residuos depositados entre los años 1979 y 1995, mientras que la etapa II contempla la recepción de residuos entre los años 1995 y 2002.

El Relleno Sanitario Santa Marta se sitúa en un valle a 12.5 Km. al poniente de la intersección de la Ruta 5 Sur con el río Maipo, comuna de Lonquén, y corresponde a un polígono de 296 Há. Este valle se encuentra limitado en sus costados sur, oriente y norte, por cadenas montañosas y cerros bajos, con un frente abierto hacia el poniente. La recepción de residuos comenzó en el año 2002.

Los análisis fisicoquímicos de los lixiviados se realizaron en el laboratorio de Planta de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Santa Marta. Dando continuidad a este estudio, se realizaron análisis biológicos, en los que se procedió a estudiar muestras frescas de residuos sólidos en fase de degradación para ser analizados en el

laboratorio de Reciclaje Orgánico de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

Los estudios en terreno y laboratorio tuvieron una duración de cinco meses, entre Abril y Agosto de 2008, realizando algunos análisis de laboratorio complementarios en Noviembre de 2008, en el Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile.

## **2.2 Análisis y colecta de la muestra de lixiviado**

Las muestras de lixiviado fueron obtenidas del interior de 8 pozos de captación de biogás de cada Relleno Sanitario (Figura 4 y 5), las cuales realizadas en 5 fechas consecutivas (una toma de muestra semanal). En cada pozo se tomaron muestras en frascos de 1000 mL determinando los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, Conductividad Eléctrica (C.E.), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO), temperatura y cloruros, se llevaron a cabo análisis externos en el laboratorio HIDROLAB correspondientes al contenido de Nitrógeno, Fósforo y Demanda Biológica de Oxígeno.

Los lixiviados en el ex Vertedero Lepanto se obtuvieron de pozos de captación de biogás de la etapa I del Relleno Sanitario. Para la comparación de parámetros versus producción de biogás, sólo 5 pozos del Relleno Sanitario Santa Marta estaban en condiciones de cuantificar el flujo, mientras que en 6 pozos del ex Vertedero Lepanto se realizaron mediciones de flujo de biogás.



**Figura 4.** Pozos de captación de biogás, para toma de muestras de lixiviado en ex vertedero Lepanto.



**Figura 5.** Toma de muestras de lixiviados en pozos de captación de biogás en Relleno Sanitario Santa Marta.

### 2.3 Análisis y colecta de residuos degradados

Para el análisis de residuos degradados se realizaron 3 calicatas (Figura 6) en cada Relleno Sanitario, que consisten en la exploración del sustrato mediante excavación, a una profundidad máxima de 6 m., tomando muestras de residuos cada un metro. A estas muestras se les realizaron análisis de porcentaje de materia orgánica, de humedad y se evaluó la actividad microbiológica mediante la tasa de respiración (producción de CO<sub>2</sub> diaria) por incubación de los residuos durante 28 días para el Relleno Sanitario Santa Marta y 15 días para ex vertedero Lepanto.



**Figura 6.** Calicatas realizadas en ambos Rellenos Sanitarios.

Las muestras se tomaron de variadas sub muestras, en un cuadrante, en distintos puntos de las calicatas (Figura 7) realizadas en el Relleno Sanitario Santa Marta. En ex Vertedero Lepanto, se realizaron dos calicatas en etapa II y una correspondiente a la etapa I del mismo. Así, en ambos Rellenos Sanitarios se obtuvo una muestra compuesta, muy heterogénea, de aproximadamente 1 Kg., con el objetivo de caracterizar las distintas zonas o niveles estudiados.



**Figura 7:** Residuos degradados sacados de la calicata realizada en Relleno Sanitario Santa Marta.

A la muestra tomada de la calicata 3 de Relleno Sanitario Santa Marta, se le realizaron análisis de porcentaje de humedad, de materia orgánica y temperatura a diferentes profundidades, tomando muestras cada un metro.

Los equipos y reactivos utilizados para la realización de los análisis fueron aportados por ambos laboratorios, incluyendo toda la instrumentación y los reactivos necesarios

#### **2.4 Vaciamiento de lixiviado al interior de un pozo en el ex Vertedero Lepanto**

Se realizó una prueba experimental de vaciamiento de lixiviados al interior de un pozo en el ex Vertedero Lepanto, durante 3 días. Se instaló una bomba sumergible que extrajo lixiviado al interior del pozo M 4-8, al lixiviado extraído se le realizó análisis de DQO en el tiempo cero, (antes de comenzar el vaciamiento) y una medición final al término de la prueba experimental (a los 3 días) se realizaron monitoreos diarios con mediciones de profundidad inicial y final del lixiviado y variación de la concentración de metano a medida que se realizaba la extracción del lixiviado.

#### **2.5 Análisis Físicoquímicos de los Lixiviados**

##### **2.5.1 Temperatura**

La temperatura se midió directamente en la muestra de líquido lixiviado, utilizando un termómetro digital de terreno. Para cada lectura se esperó un tiempo adecuado de manera de permitir la estabilización y posterior registro de la lectura.

## 2.5.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para determinar la DQO se usó el método colorimétrico de dicromato a refluo cerrado el cual se basa en la cantidad de un oxidante específico que reacciona con una muestra bajo condiciones controladas. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ ). La determinación de DQO se realizó en un reactor de bloque (DRB 200) HACH, utilizando viales para determinación de DQO 0-15000  $\text{mg/l}$  HACH. Para su medición se utilizó Colorímetro portátil DR/890 HACH (Figura 8).



**Figura 8.** Equipos utilizados para determinación de DQO.

### 2.5.3 Cloruros

Los cloruros presentes en los lixiviados se determinaron a través del método de titulación con nitrato de plata. El método se basa en la titulación de un volumen de muestra, con una solución patrón de nitrato de plata, generalmente en concentración de 0,05 N utilizando dicromato de potasio como indicador del punto final de la reacción:



### 2.5.4 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica se midió directamente en las muestras de lixiviado utilizando un conductímetro portátil HANNA, previamente calibrado.

### 2.5.5 Sólidos Suspendidos Totales

La determinación del contenido de sólidos suspendidos totales (SST) se realizó de acuerdo al método 2540E de Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (APHA, 1992). Los SST se determinan mediante el peso del residuo, secado a 105° C en estufa (Binder), durante una hora. Para el cálculo se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{SST (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{Volumen de muestra, mL}}$$

Donde:

A = peso de la placa + muestra a 105 ° C, mg

B = peso de la placa, mg

### **2.5.6 Determinación de pH**

El pH mide la concentración del Ion hidrógeno en las soluciones acuosas:

$$\text{pH} = - \log [ \text{H}^+ ]$$

El pH se midió directamente sobre la muestra, usando un pH metro con electrodo combinado, calibrando con disoluciones tampón estándar de pH 7 y 4.

## **2.6 Análisis de Residuos Sólidos Degradados**

### **2.6.1 Humedad:**

El contenido de agua en las muestras degradadas se midió mediante el método gravitatorio a 70+- 5° C, hasta masa constante. El procedimiento fue el siguiente:

Se masaron 10 gr. de la muestra a analizar en una cápsula de aluminio previamente pesada. La muestra se llevó a la estufa de secado a 70 +- 5° C hasta masa constante. (se entiende por masa constante aquel que se determina 3 veces con diferencia de al menos 12 horas y no presenta variación).

La humedad se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1} * 100$$

Donde,

P<sub>1</sub>= peso de la cápsula.

P<sub>2</sub>= peso de la cápsula con la muestra sin secar.

P<sub>3</sub>= peso de la cápsula con la muestra seca.

### **2.6.2 Materia Orgánica**

Para determinar el contenido de Materia Orgánica se usó método gravimétrico, la muestra fue tamizada a 4 mm y posteriormente molida en un mortero. Luego fue sometida a calcinación a 600° C durante 2 horas en una mufla. El porcentaje de materia orgánica se calcula como la diferencia de masa de la muestra al ingreso, secada previamente a 65°C y posterior a la calcinación.

### **2.6.3 Determinación Actividad Respiratoria**

Para determinar la actividad respiratoria de las muestras se evaluó el desprendimiento de CO<sub>2</sub> como una medida de la actividad metabólica total del sustrato y por lo tanto, está relacionada con la fracción de la Materia Orgánica lábil o más susceptible a la descomposición.

Para ello, las muestras se incubaron a 25 °C en frascos plásticos sellados, durante 28 días en el Relleno Sanitario Santa Marta, y durante 16 días para las muestras del ex Vertedero Lepanto. La producción de CO<sub>2</sub> de la muestra se determinó diariamente.

El desprendimiento de CO<sub>2</sub> se determinó de acuerdo al método de incubación en medio cerrado con 10 mL de NaOH 0,2 N (Ponchon, 1962, adaptado por Varnero 1990), mediante titulación de la soda no carbonada con HCl 0,1 N en presencia de 5 gotas de timoftaleína al 1%, luego de la precipitación de los carbonatos con 2 ml de BaCl<sub>2</sub> al 20%. La titulación dio cuenta del NaOH que no reaccionó con el CO<sub>2</sub>. De acuerdo a esto, los mililitros de NaOH 0,2 N que representan a la soda libre de CO<sub>2</sub> corresponden a la mitad de mililitros de HCl 0,1 N utilizados en la titulación.

## **2.7 Análisis Estadístico**

Para el estudio estadístico se utilizó software SPSS 15.0, realizando los siguientes análisis: Correlación de Pearson, Regresión Lineal (mínimos cuadrados ordinarios), Estimación curvilínea (cuadrático inverso), Comparación de medias por prueba no paramétrica de U. de Man Witney, Prueba de Moses, Comparación 3 o más medias utilizando ANOVA y Tukey.

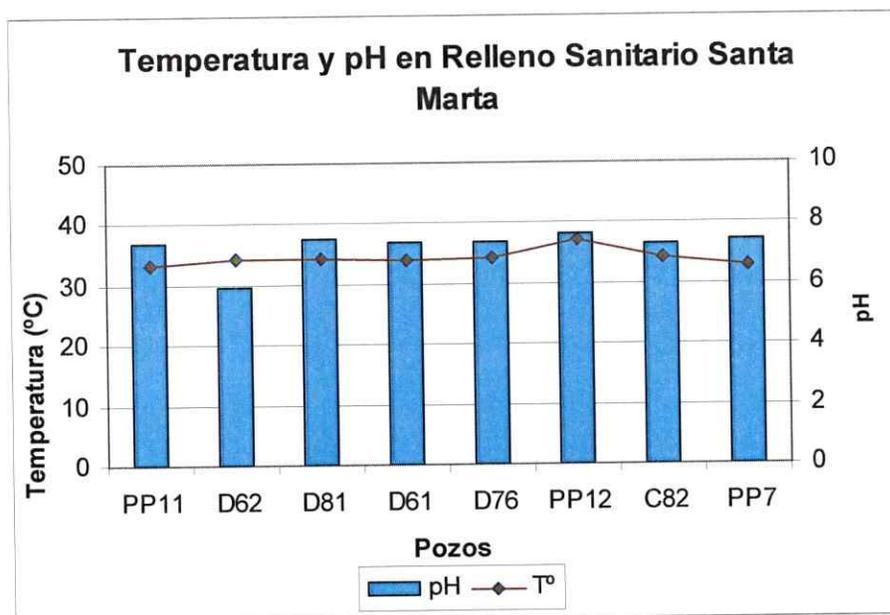
Para describir la evolución de las cantidades acumuladas de CO<sub>2</sub> en función del tiempo, se utilizó una regresión simple en gráfico de dispersión.

### III. RESULTADOS

#### 3.1 Análisis Físicoquímicos de los lixiviados

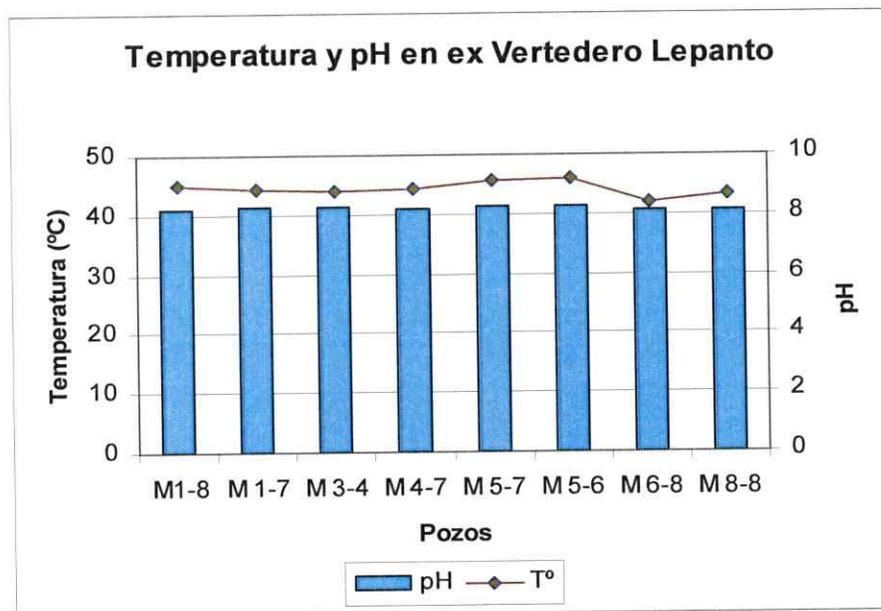
##### 3.1.1 Temperatura y pH

Las mediciones de temperatura señalaron que en promedio la fase mesofílica del proceso es obtenida durante el periodo de estudio en el Relleno Sanitario Santa Marta (Figura 9), con un promedio de 35°C, presentando oscilaciones entre los 32 y 39° C. Los lixiviados de pozos de este Relleno Sanitario mantuvieron un pH promedio un pH 7,3 (Figura 13) con valores que oscilan entre los 5,9 y 7,6. El pozo D 62 fue el que presentó valores de pH menores a 5,9.



**Figura 9.** Mediciones de temperatura y pH en muestras de lixiviados de Relleno Sanitario Santa Marta. Los valores de temperatura se mantuvieron en un rango de 32-39 °C, mientras los de pH variaron entre 5,9 y 7,6 unidades.

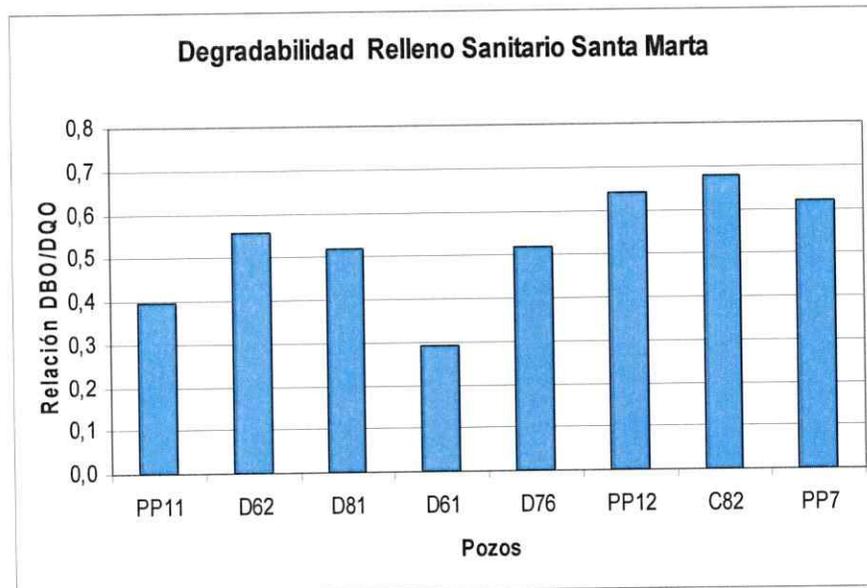
Las temperaturas alcanzadas para los lixiviados de pozos en el ex Vertedero Lepanto señalaron un proceso mesofílico, con un promedio de 41°C, y temperaturas que variaron entre 41 y 46° C (Figura 14). En los lixiviados analizados el pH fue de un valor aproximado de pH 8, presentando valores que alcanzaron hasta un pH 8,3 (Figura 10). Estos valores corresponden a lixiviados en fase III de degradación de los residuos, pues presentan valores de pH sobre los 7,5, correspondientes a la última fase de producción de metano (Tabla 2, página 6).



**Figura 10:** Mediciones de temperatura y pH en muestras de lixiviados de el ex Vertedero Lepanto. Se muestra que las temperaturas presentaron un rango entre 41-46 °C, mientras el pH presentó variaciones entre 8 y 8,3.

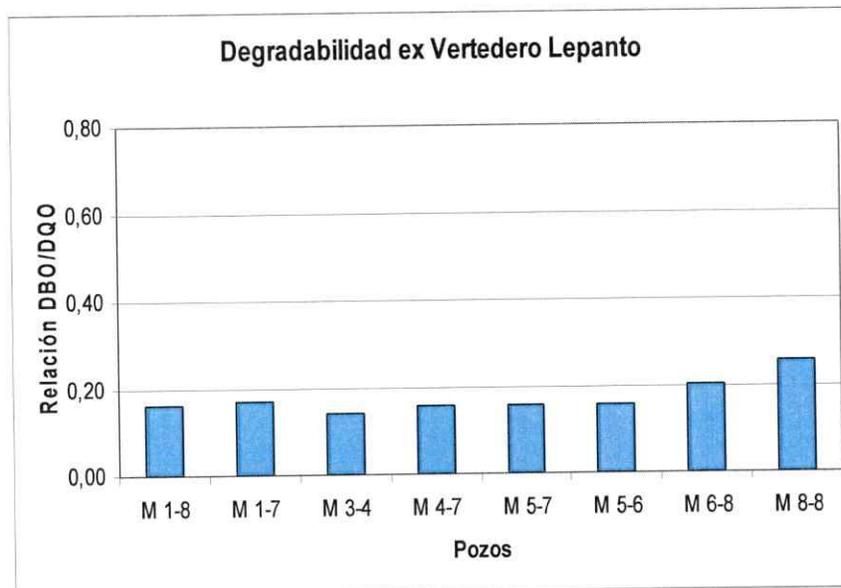
### 3.1.2 Degradabilidad ( $DBO_5/DQO$ )

La degradabilidad fue determinada como la razón entre  $DBO_5/DQO$  (Tabla 2). En el Relleno Sanitario Santa Marta las muestras de los pozos analizados presentan diferentes valores entre 0,3 y 0,7 (Figura 11). Esta alta degradabilidad indica que el Relleno Sanitario Santa Marta se encuentra en una fase inicial de degradación.



**Figura 11.** Degradabilidad medida como la relación  $DBO_5/DQO$  en muestras de lixiviados de Relleno Sanitario Santa Marta. La degradabilidad de las muestras analizadas presentó variaciones entre 0,3 y 0,7 para los distintos lixiviados de cada pozo.

En cambio en el ex vertedero Lepanto, los lixiviados analizados tienen valores de degradabilidad cercanos a 0,2 (Figura 12) por tanto se trata de lixiviados maduros según lo indicado en la Tabla 2. Todos los valores encontrados están conforme a la fase II de degradación anaeróbica, correspondiente a una carga orgánica media entre 10 y 20%.



**Figura 12.** Degradabilidad medida como la relación DBO/DQO en lixiviados de el ex Vertedero Lepanto. La degradabilidad de las muestras analizadas presentó variaciones cercanas a 0,2 para los distintos lixiviados de cada pozo.

Existen diferencias significativas entre las medias de los Rellenos Sanitarios correspondientes al 0,01 (Anexo, Tabla 1). Se puede agregar además que existe alta variabilidad en los datos de la muestra de un Relleno Sanitario con respecto al otro (Anexo, Tabla 2).

### 3.2 Producción de Biogás

Los análisis fisicoquímicos realizados en los lixiviados de ambos Rellenos Sanitarios (Tabla 3) demuestran que todas las variables presentan una correlación significativa con el flujo del lixiviado, exceptuando Conductividad Eléctrica. (Tabla 4).

La relación más importante es el pH, a medida que disminuye su valor, aumenta el flujo. Si el pH aumentara en un 10%, el flujo disminuiría su valor en un 7,1%. En orden jerárquico, la seguiría la DBO, al aumentar ésta en un valor del 100%, el flujo aumentaría en un 66%. Al aumentar los SSV en un 100%, el flujo aumentaría en un 54%. Si aumentarían los SST en un 100%, el flujo incrementaría su valor en un 48%, la DQO incrementaría el valor en un 36%, y al aumentar la temperatura el flujo disminuiría en un 29%.

**Tabla 3.** Datos de los resultados promedios obtenidos para los análisis fisicoquímicos efectuados a los lixiviados de cada

Relleno Sanitario.

| POZOS                                | DQO<br>mg/L | SST<br>mg/L | SSV<br>mg/L | Cl-<br>mg/L | CE<br>S/m | DBO<br>mg/L | P<br>mg/L | N<br>mg/L | Flujo de biogás<br>m <sup>3</sup> /Hr |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|---------------------------------------|
| <b>RELLENO SANITARIO SANTA MARTA</b> |             |             |             |             |           |             |           |           |                                       |
| PP11                                 | 10.380      | 116         | 24          | 3.739       | 27.440    | 4.220       | 39        | 1.799     | 0                                     |
| D62                                  | 91.420      | 273         | 263         | 3.438       | 36.200    | 58.100      | 66        | 2.253     | 125,3                                 |
| D81                                  | 12.100      | 165         | 43          | 3.556       | 29.420    | 6.440       | 55        | 2.272     | 34,6                                  |
| D61                                  | 16.140      | 532         | 243         | 4.145       | 30.720    | 4.345       | 37        | 1.964     | 90,7                                  |
| D76                                  | 13.420      | 167         | 60          | 3.645       | 26.620    | 8.595       | 42        | 1.931     | 38                                    |
| PP12                                 | 11.800      | 89          | 26          | 3.404       | 30.880    | 8.485       | 58        | 2.263     | 30,2                                  |
| C82                                  | 11.220      | 149         | 42          | 3.781       | 26.360    | 8.153       | 40        | 1.485     | 0                                     |
| PP7                                  | 13.440      | 106         | 28          | 3.667       | 31.520    | 8.043       | 63        | 1.136     | 0                                     |
| promedio                             | 21.947      | 182         | 86          | 3.669       | 29.696    | 13.770      | 53        | 1.924     | 35                                    |
| desvet                               | 26.115      | 146         | 96          | 218         | 3.031     | 17.074      | 15        | 397       | 45                                    |
| <b>EX VERTEDERO LEPANTO</b>          |             |             |             |             |           |             |           |           |                                       |
| M 1-8                                | 24.300      | 150         | 162         | 4.228       | 32.460    | 3.670       | 130       | 2.161     | 20,9                                  |
| M 1-7                                | 45.850      | 150         | 264         | 4.248       | 37.520    | 7.240       | 59,5      | 2.178     | 10,3                                  |
| M 3-4                                | 40.900      | 213         | 96          | 4.081       | 37.280    | 5.900       | 68,1      | 2.143     | 9,6                                   |
| M 4-7                                | 39.510      | 170         | 80          | 4.251       | 37.840    | 6.160       | 168       | 2.117     | 0                                     |
| M 5-7                                | 37.510      | 208         | 72          | 4.460       | 38.660    | 5.680       | 92,4      | 2.108     | 0                                     |
| M 5-6                                | 38.740      | 243         | 244         | 4.328       | 38.680    | 6.240       | 138       | 2.196     | 4,9                                   |
| M 6-8                                | 66.300      | 197         | 76          | 4.473       | 41.120    | 12.740      | 81        | 2.178     | 11,3                                  |
| M 8-8                                | 84.140      | 200         | 112         | 4.384       | 41.240    | 21.450      | 89,1      | 2.152     | 13                                    |
| promedio                             | 47.156      | 192         | 138         | 4.307       | 38.100    | 8.635       | 103       | 2.154     | 9                                     |
| desvet                               | 18.973      | 32          | 77          | 131         | 2.739     | 5.803       | 38        | 31        | 7                                     |

**Tabla 4.** Correlaciones entre las diferentes variables analizadas y el flujo de biogás.

Correlaciones

|                                 |   | Flujo m <sup>3</sup> /hr<br>Lixiviado |
|---------------------------------|---|---------------------------------------|
| Demanda Química de Oxígeno      | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | ,357**<br>,001<br>86                  |
| Sólidos en Suspensión Totales   | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | ,481**<br>,000<br>86                  |
| Cloro                           | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -,212*<br>,050<br>86                  |
| Conductividad Eléctrica         | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -,078<br>,475<br>86                   |
| Temperatura                     | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -,293**<br>,006<br>86                 |
| Nivel de Acidez o Alcalinidad   | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -,713**<br>,000<br>86                 |
| Demanda Biológica de Oxígeno    | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | ,665**<br>,000<br>86                  |
| Fósforo                         | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | -,257*<br>,017<br>86                  |
| Nkjdl                           | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | ,222*<br>,040<br>86                   |
| Sólidos en Suspensión Volátiles | Correlación de Pearson<br>Sig. (bilateral)<br>N | ,540**<br>,000<br>86                  |

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* . La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).

Para estimar el modelo de regresión lineal se incluyeron todas las variables fisicoquímicas analizadas, dado que la gran mayoría de variables poseen una correlación significativa (en relación al flujo) exceptuando Conductividad Eléctrica. Los resultados se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5.** Resumen del modelo de regresión lineal. (Incluidos ambos Rellenos)

**Resumen del modelo**

| Modelo | R                 | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|
| 1      | ,882 <sup>a</sup> | ,777       | ,748                 | 17,365                      |

a. Variables predictoras: (Constante), Sólidos en Suspensión Volátiles, Nivel de Acidez o Alcalinidad, Nitrógeno, Demanda Química de Oxígeno, Sólidos en Suspensión Totales, Fósforo, Cloro, Conductividad Eléctrica, Temperatura, Demanda Biológica de Oxígeno

El R<sup>2</sup> es alto: El modelo explica un 75% aproximadamente el nivel de flujo del lixiviado.

$$F \text{ Lix} = 283,837 + 0,043*SST - 0,002*CE + 0,894*T^{\circ} - 41,387*PH + 0,015*N + 0,124*SSV$$

Donde,

F Lix: Flujo del Biogás

SST: Sólidos Suspendidos Totales

CE: Conductividad Eléctrica

T°: Temperatura

N: Nitrógeno

SSV: Sólidos Suspendidos Totales

Sin embargo, los resultados del modelo muestran que no todas las variables son significativas en un modelo lineal: Sólo lo son la constante del modelo (flujo), SST (al 10%), CE (al 10%), pH (al 5%), Nitrógeno (al 10%) y SSV (al 1%). ( Ver Tabla 6)

**Tabla 6.** Significancias de las variables en el modelo de regresion lineal.

| Modelo |                                   | Coeficientes <sup>a</sup>      |            |                             |        |      |
|--------|-----------------------------------|--------------------------------|------------|-----------------------------|--------|------|
|        |                                   | Coeficientes no estandarizados |            | Coeficientes estandarizados | t      | Sig. |
|        |                                   | B                              | Error típ. | Beta                        |        |      |
| 1      | (Constante)                       | 283,837                        | 91,038     |                             | 3,118  | ,003 |
|        | Demanda Química de Oxígeno        | ,000                           | ,000       | ,241                        | 1,379  | ,172 |
|        | * Sólidos en Suspensión Totales   | ,043                           | ,023       | ,156                        | 1,866  | ,066 |
|        | Cloro                             | ,005                           | ,004       | ,125                        | 1,138  | ,259 |
|        | * Conductividad Eléctrica         | -,002                          | ,001       | -,235                       | -1,732 | ,087 |
|        | Temperatura                       | ,894                           | ,962       | ,141                        | ,929   | ,356 |
|        | * Nivel de Acidez o Alcalinidad   | -41,387                        | 17,087     | -,701                       | -2,422 | ,018 |
|        | Demanda Biológica de Oxígeno      | ,000                           | ,001       | -,058                       | -,230  | ,819 |
|        | Fósforo                           | -,030                          | ,079       | -,032                       | -,381  | ,704 |
|        | * Nitrógeno                       | ,015                           | ,007       | ,148                        | 1,956  | ,054 |
|        | * Sólidos en Suspensión Volátiles | ,124                           | ,032       | ,301                        | 3,857  | ,000 |

a. Variable dependiente: Flujo m3/hr Lixiviado

\* variables significativas

En el siguiente gráfico (Figura 13) se explica el grado de ajuste del modelo mediante sus residuos. Los residuos tipificados observados (estandarizados, van del 0 a 1) están en círculos y la regresión representada por la curva ajustada a las observaciones.

### Gráfico P-P normal de regresión Residuo tipificado

Variable dependiente: Flujo m<sup>3</sup>/hr Lixiviado

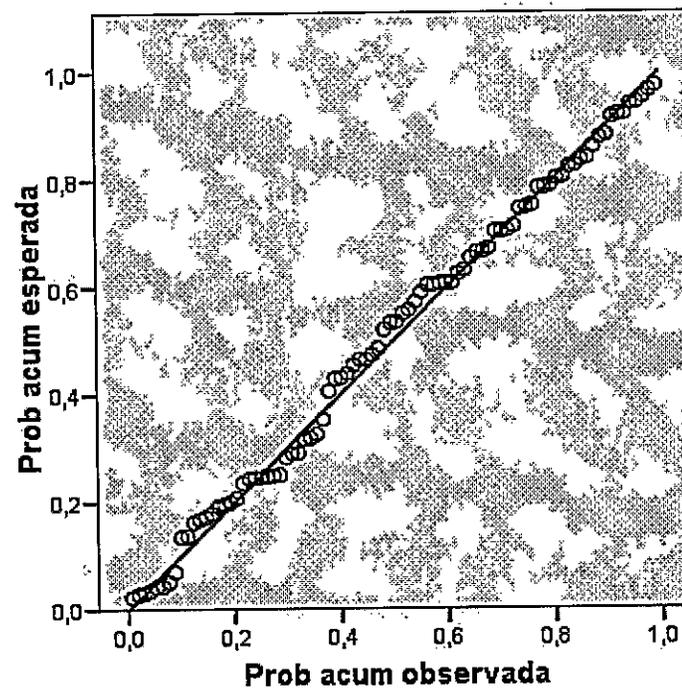


Figura 13. Gráfico probabilidad-probabilidad de la regresión lineal.

Para poder comparar ambos Rellenos Sanitarios se realizó un análisis estadístico de medias en cada Relleno Sanitario (Tabla 7) y se determinó que existe diferencia significativa entre las distintas variables de cada Relleno Sanitario (Anexo, Tabla 5), excepto SST y flujo que no presentan medias estadísticamente diferentes.

**Tabla 7:** Comparación de medias para ambos Rellenos Sanitarios

| Estadísticos de grupo           |             |    |          |                 |                        |
|---------------------------------|-------------|----|----------|-----------------|------------------------|
|                                 | Vertedero   | N  | Media    | Desviación ttp. | Error ttp. de la media |
| Demanda Química de Oxígeno      | Lepanto     | 50 | 41557,74 | 19829,083       | 2804,256               |
|                                 | Santa Marta | 50 | 20617,00 | 24255,710       | 3430,275               |
| Sólidos en Suspensión Totales   | Lepanto     | 50 | 182,65   | 77,317          | 10,934                 |
|                                 | Santa Marta | 50 | 195,38   | 155,048         | 21,927                 |
| Cloro                           | Lepanto     | 50 | 4767,22  | 1499,943        | 212,124                |
|                                 | Santa Marta | 50 | 3693,80  | 414,897         | 58,675                 |
| Conductividad Eléctrica         | Lepanto     | 50 | 37948,00 | 2724,061        | 385,240                |
|                                 | Santa Marta | 50 | 30190,00 | 3166,099        | 447,754                |
| Temperatura                     | Lepanto     | 50 | 41,144   | 7,0556          | ,9978                  |
|                                 | Santa Marta | 50 | 34,474   | 2,2473          | ,3178                  |
| Nivel de Acidez o Alcalinidad   | Lepanto     | 50 | 8,1665   | ,19471          | ,02754                 |
|                                 | Santa Marta | 50 | 7,3014   | ,48435          | ,06850                 |
| Profundidad del Lixiviado       | Lepanto     | 45 | 16,7756  | 6,14086         | ,91542                 |
|                                 | Santa Marta | 45 | ,3267    | ,11451          | ,01707                 |
| Flujo m3/hr Lixiviado           | Lepanto     | 36 | 6,88     | 7,411           | 1,235                  |
|                                 | Santa Marta | 45 | 35,42    | 42,889          | 6,393                  |
| Demanda Biológica de Oxígeno    | Lepanto     | 50 | 7761,50  | 5223,711        | 738,744                |
|                                 | Santa Marta | 50 | 12821,40 | 15692,663       | 2219,278               |
| Fósforo                         | Lepanto     | 50 | 102,01   | 34,403          | 4,865                  |
|                                 | Santa Marta | 50 | 51,77    | 14,728          | 2,083                  |
| Nitrógeno                       | Lepanto     | 50 | 1936,40  | 535,728         | 75,763                 |
|                                 | Santa Marta | 50 | 1960,10  | 374,656         | 52,984                 |
| Sólidos en Suspensión Volátiles | Lepanto     | 50 | 145,30   | 70,552          | 9,978                  |
|                                 | Santa Marta | 50 | 90,50    | 87,438          | 12,366                 |

Se realizó una prueba de reacciones extremas de moises (Tabla 8), para poder determinar la variabilidad de los datos de un Relleno Sanitario con respecto del otro, y

se determinó que DQO, T° y DBO<sub>5</sub> no son estadísticamente diferentes. Las demás variables sí.

**Tabla 8.** Prueba de reacciones extremas de Moses.

**Estadísticos de contraste**

|  | DQO1       | SST1       | CL-1       | CE1        | T°1        | Ph1        | Prof.lix.<br>1 | Flujo<br>m3/hr1 | DBO1       | Pt1        | Nkjdl1     | SSV1       |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|
| Amplitud observada del grupo control Sig. (unilateral) | 94<br>,056 | 89<br>,002 | 52<br>,000 | 57<br>,000 | 89<br>,002 | 95<br>,102 | 41<br>,000     | 57<br>,000      | 86<br>,000 | 51<br>,000 | 56<br>,000 | 61<br>,000 |
| Amplitud recortada del grupo control Sig. (unilateral) | 88<br>,277 | 77<br>,001 | 46<br>,000 | 53<br>,000 | 87<br>,194 | 64<br>,000 | 41<br>,000     | 56<br>,001      | 86<br>,131 | 51<br>,000 | 56<br>,000 | 61<br>,000 |
| Valores atípicos recortados de cada extremo            | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          | 2          | 2              | 1               | 2          | 2          | 2          | 2          |

a. Prueba de Moses

b. Variable de agrupación: vertedero

### 3.2.1 Datos en cada Relleno Sanitario

Según análisis ANOVA (Tabla 9) realizado para los datos de el ex Vertedero Lepanto, en casi todas las variables fisicoquímicas de los pozos estudiados existe una diferencia significativa al 1%, excepto SST donde no hay diferencia significativa y para los Cloruros en que hay diferencia al 10%.

Sin embargo, al realizar el análisis de Tukey, se observa que las variables se comportan bastantes similares. El 50% de los pozos presenta un subconjunto en DQO de similitud al 0,05. Con respecto a la Conductividad Eléctrica, el 63% se subagrupa relacionados en una similitud del 0,05. Al analizar la variable Temperatura, se observan 2 subconjuntos principalmente muy relacionados entre ellos, con valores significativamente similares. Para los valores de pH existen 2 subconjuntos con similitudes significativas (Anexo, Tabla 7).

**Tabla 9. Análisis de media entre pozos para ex Vertedero Lepanto**

|                                 |              | ANOVA             |    |                  |         |      |
|---------------------------------|--------------|-------------------|----|------------------|---------|------|
|                                 |              | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F       | Sig. |
| Demanda Química de Oxígeno      | Inter-grupos | 1,02E+010         | 7  | 1,5E+009         | 219,886 | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 171715875         | 26 | 6604456,7        |         |      |
|                                 | Total        | 1,03E+010         | 33 |                  |         |      |
| Sólidos en Suspensión Totales   | Inter-grupos | 22184,428         | 7  | 3169,204         | ,564    | ,778 |
|                                 | Intra-grupos | 146137,794        | 26 | 5620,684         |         |      |
|                                 | Total        | 168322,222        | 33 |                  |         |      |
| Cloro                           | Inter-grupos | 728210,363        | 7  | 104030,052       | 2,149   | ,074 |
|                                 | Intra-grupos | 1258756,8         | 26 | 48413,722        |         |      |
|                                 | Total        | 1986967,1         | 33 |                  |         |      |
| Conductividad Eléctrica         | Inter-grupos | 211453647         | 7  | 30207664         | 24,041  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 32669000          | 26 | 1256500,0        |         |      |
|                                 | Total        | 244122647         | 33 |                  |         |      |
| Temperatura                     | Inter-grupos | 50,281            | 7  | 7,183            | 37,932  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 4,924             | 26 | ,189             |         |      |
|                                 | Total        | 55,205            | 33 |                  |         |      |
| Nivel de Acidez o Alcalinidad   | Inter-grupos | ,137              | 7  | ,020             | 4,553   | ,002 |
|                                 | Intra-grupos | ,112              | 26 | ,004             |         |      |
|                                 | Total        | ,248              | 33 |                  |         |      |
| Profundidad del Lixiviado       | Inter-grupos | 418,141           | 7  | 59,734           | 3E+032  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 26 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 418,141           | 33 |                  |         |      |
| Flujo m3/hr Lixiviado           | Inter-grupos | 1569,531          | 7  | 224,219          | 23,084  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 252,541           | 26 | 9,713            |         |      |
|                                 | Total        | 1822,072          | 33 |                  |         |      |
| Demanda Biologica de Oxígeno    | Inter-grupos | 956976047         | 7  | 1,4E+008         | .       | .    |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 26 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 956976047         | 33 |                  |         |      |
| Fósforo                         | Inter-grupos | 44536,685         | 7  | 6362,384         | 5E+032  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 26 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 44536,685         | 33 |                  |         |      |
| Nitrógeno                       | Inter-grupos | 29601,441         | 7  | 4228,777         | .       | .    |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 26 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 29601,441         | 33 |                  |         |      |
| Sólidos en Suspensión Volátiles | Inter-grupos | 174092,235        | 7  | 24870,319        | .       | .    |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 26 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 174092,235        | 33 |                  |         |      |

Al realizar análisis de media para los pozos del Relleno Sanitario Santa Marta, (Tabla 10), se observó una diferencia significativa para todas las variables en los pozos, excepto para Cloruros.

**Tabla 10. Análisis de medias de los pozos para Relleno Sanitario Santa Marta.**

ANOVA

|                                 |              | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F       | Sig. |
|---------------------------------|--------------|-------------------|----|------------------|---------|------|
| Demanda Química de Oxígeno      | Inter-grupos | 2,73E+010         | 8  | 3,4E+009         | 173,820 | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 706234000         | 36 | 19617611         |         |      |
|                                 | Total        | 2,80E+010         | 44 |                  |         |      |
| Sólidos en Suspensión Totales   | Inter-grupos | 849252,444        | 8  | 106156,556       | 17,237  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 221714,800        | 36 | 6158,744         |         |      |
|                                 | Total        | 1070967,2         | 44 |                  |         |      |
| Cloro                           | Inter-grupos | 1907937,6         | 8  | 238492,200       | 1,385   | ,236 |
|                                 | Intra-grupos | 6200271,6         | 36 | 172229,767       |         |      |
|                                 | Total        | 8108209,2         | 44 |                  |         |      |
| Conductividad Eléctrica         | Inter-grupos | 367595111         | 8  | 45949389         | 19,659  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 84144000          | 36 | 2337333,3        |         |      |
|                                 | Total        | 451739111         | 44 |                  |         |      |
| Temperatura                     | Inter-grupos | 187,675           | 8  | 23,459           | 434,433 | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 1,944             | 36 | ,054             |         |      |
|                                 | Total        | 189,619           | 44 |                  |         |      |
| Nivel de Acidez o Alcalinidad   | Inter-grupos | 11,195            | 8  | 1,399            | 337,094 | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | ,149              | 36 | ,004             |         |      |
|                                 | Total        | 11,344            | 44 |                  |         |      |
| Profundidad del Lixiviado       | Inter-grupos | ,577              | 8  | ,072             | 9E+032  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | ,577              | 44 |                  |         |      |
| Flujo m3/hr Lixiviado           | Inter-grupos | 80935,878         | 8  | 10116,985        | .       | .    |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 80935,878         | 44 |                  |         |      |
| Demanda Biológica de Oxígeno    | Inter-grupos | 1,17E+010         | 8  | 1,5E+009         | .       | .    |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 1,17E+010         | 44 |                  |         |      |
| Fósforo                         | Inter-grupos | 9466,178          | 8  | 1183,272         | 1E+033  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 9466,178          | 44 |                  |         |      |
| Nitrógeno                       | Inter-grupos | 6302340,0         | 8  | 787792,500       | .       | .    |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 6302340,0         | 44 |                  |         |      |
| Sólidos en Suspensión Volátiles | Inter-grupos | 365054,444        | 8  | 45631,806        | .       | .    |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 365054,444        | 44 |                  |         |      |

Sin embargo, al realizar el análisis de Tukey se observa que sí existen pozos bastantes similares en sus variables. El 88% de los pozos presenta una similitud con significancia de 0,05 para la DQO. Al analizar SST, se pueden agrupar 2 subconjuntos. En temperatura, el 56 % de pozos presenta un comportamiento similar. Al analizar pH, se forman dos subconjuntos significativamente similares.

### 3.3 Vaciamiento de lixiviados al interior de un pozo en ex Vertedero Lepanto.

Al realizar la prueba de vaciamiento del pozo M 4-8 del ex vertedero Lepanto, se observó como en dos fechas de estudio consecutivas (al inicio de la prueba y al tercer día) se produjo un efecto visible (Tabla 11), disminuyó la profundidad del lixiviado aproximadamente a la mitad del contenido inicial, la concentración de DQO disminuyó en un 44 % y el flujo de biogás medido en el pozo aumentó 5.4 veces su valor inicial.

**Tabla 11.** Variación de algunas características del lixiviado, realizadas en prueba de vaciamiento de pozo M 4-8 en ex Vertedero Lepanto.

|                          | Profundidad del lixiviado (m) | Flujo de biogás (m <sup>3</sup> /Hr) | DQO (mg/L) |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------|
| pozo M4-8 <sup>(1)</sup> | 10                            | 1,77                                 | 37700      |
| pozo M4-8 <sup>(2)</sup> | 5                             | 9,7                                  | 16800      |

(1) muestra de lixiviado tomada al inicio del vaciamiento

(2) muestra de lixiviado tomada al final del vaciamiento, al tercer día.

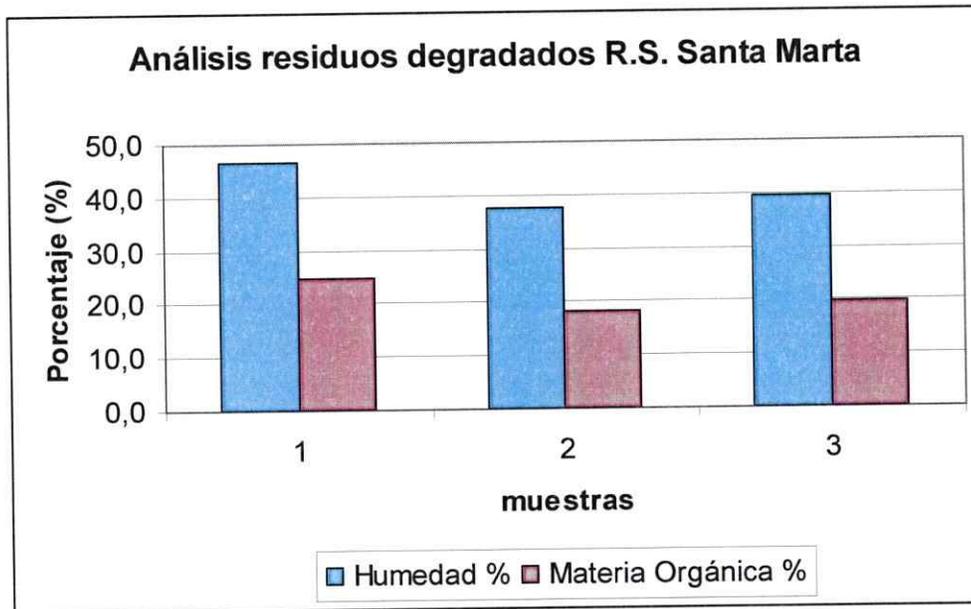
El vaciamiento del lixiviado mostró una evolución en la concentración de metano (Tabla 12). El primer día de vaciamiento del pozo M 4-8, hubo un aumento en la concentración de metano de un 37,6% (valor inicial) hasta llegar a un valor de 41,5%. El segundo día de prueba tuvo bastantes oscilaciones, la concentración de metano varió respecto del día anterior, inclusive alcanzó rangos inferiores a los del inicio de la prueba experimental durante el primer día. El tercer día se observó nuevamente un incremento de la concentración de metano, las concentraciones de metano alcanzaron un valor mayor al inicial y mantuvieron rangos de metano entre 41-43 %.

**Tabla 12.** Concentración de metano en pozo M 4-8 , a medida que se realizaba el vaciamiento de lixiviado (datos tomados cada dos horas, durante tres días consecutivos).

| Concentración de metano (%) |         |         |          |
|-----------------------------|---------|---------|----------|
| tiempo (Hr)                 | día uno | día dos | día tres |
| 1:00                        | 37,6    | 34,5    | 43,8     |
| 3:00                        | 37,6    | 34,8    | 42,6     |
| 5:00                        | 38,1    | 35,1    | 38,5     |
| 7:00                        | 38,1    | 35,1    | 50,2     |
| 9:00                        | 38,4    | 35,4    | 57,8     |
| 11:00                       | 38,4    | 35,1    | 61,6     |
| 13:00                       | 39,2    | 35,1    | 42,2     |
| 15:00                       | 39,2    | 35,3    | 42,2     |
| 17:00                       | 40      | 36      | 43,7     |
| 19:00                       | 40      | 35,4    | 38,7     |
| 21:00                       | 41      | 35,3    | 41,5     |
| 23:00                       | 41,5    | 35      | 41,6     |

### 3.4 Materia Orgánica en los Residuos Sólidos

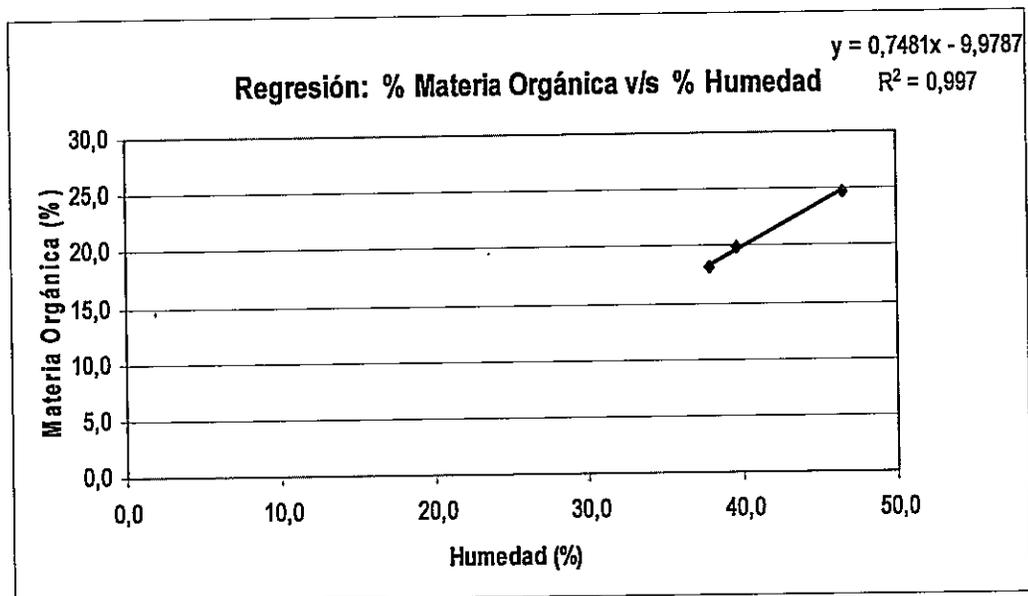
Los residuos sólidos analizados alcanzaron un promedio de 41% de humedad para las muestras derivadas del Relleno Sanitario Santa Marta. El nivel de materia orgánica encontrado en las distintas muestras se mantuvo en rangos que variaron del 18 al 25%, con un promedio de 21% de materia orgánica (Figura 14).



**Figura 14.** Resultado Análisis Residuos Degradados Relleno Sanitario Santa Marta.

Las muestras corresponden al promedio de los datos a distintas profundidades, encontrados en cada una de las 3 calicatas realizadas en Relleno Sanitario Santa Marta.

En Relleno Sanitario Santa Marta existe una correlación positiva entre los dos parámetros analizados. A medida que la muestra presentó mayor porcentaje de humedad, se incrementó la concentración de materia orgánica (Figura 15).



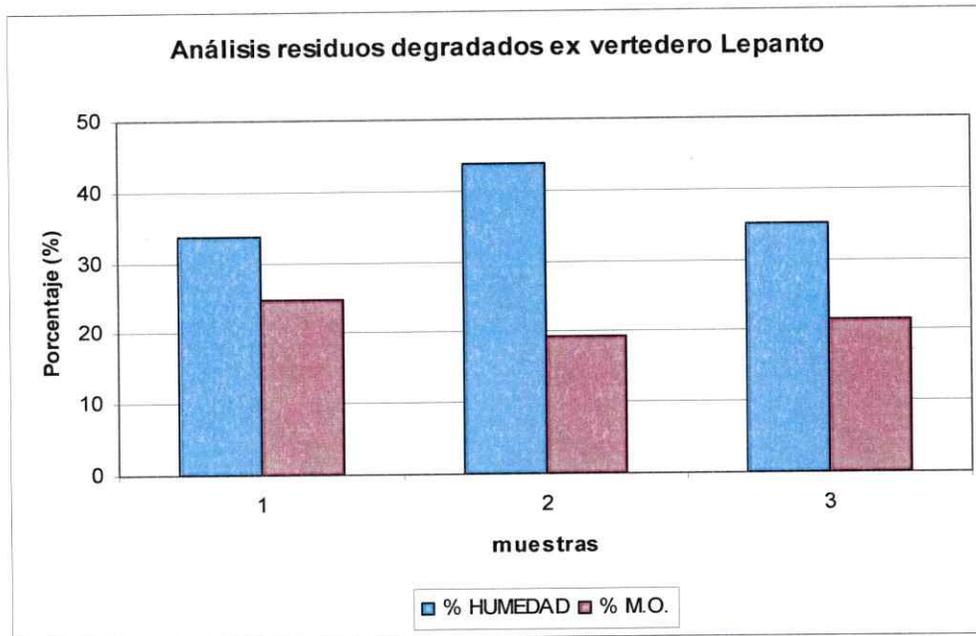
**Figura 15.** Regresión del porcentaje materia orgánica y humedad en Relleno Sanitaria Santa Marta realizada a las muestras de residuos degradados de las 3 calicatas. A medida que la muestra presentó mayor porcentaje de humedad, denoto un incremento en la concentración de materia orgánica.

Las muestras realizadas a diferentes profundidades en una misma calicata (muestra calicata 3) en el Relleno Sanitario Santa Marta, presentaron características variables. Los rangos de temperatura determinan que existe actividad mesofílica metanogénica de las bacterias hasta los 6 metros de profundidad (Tabla 13). A medida que aumenta la profundidad, incrementa levemente la temperatura alcanzando valores de 40 °C, aumentando relativamente el porcentaje de humedad y de la misma forma se acrecienta levemente el porcentaje de materia orgánica disponible.

**Tabla 13.** Datos de análisis realizados a calicata 3 en Relleno Sanitario Santa Marta

| Profundidad | % HUMEDAD | % M.O. | % C.OT. | T° |
|-------------|-----------|--------|---------|----|
| a 1 m       | 38        | 19     | 10      | 33 |
| a 2 m       | 41        | 21     | 12      | 35 |
| a 3 m       | 36        | 17     | 9       | 35 |
| a 4 m       | 40        | 19     | 11      | 36 |
| a 5 m       | 46        | 22     | 12      | 38 |
| a 6 m       | 47        | 27     | 15      | 40 |

En el ex vertedero Lepanto se registra un promedio de 37% de humedad para las muestras analizadas. El nivel más alto de humedad se encontró en la muestra 2, con un valor de 44% de humedad, la cual presenta una diferencia de un 8% con respecto a las muestras restantes. Esta misma muestra fue la que presentó valores de materia orgánica menores llegando a un 19%, mientras que la muestra 1 y 3 presentaron valores de 25 y 22% respectivamente (Figura 16).



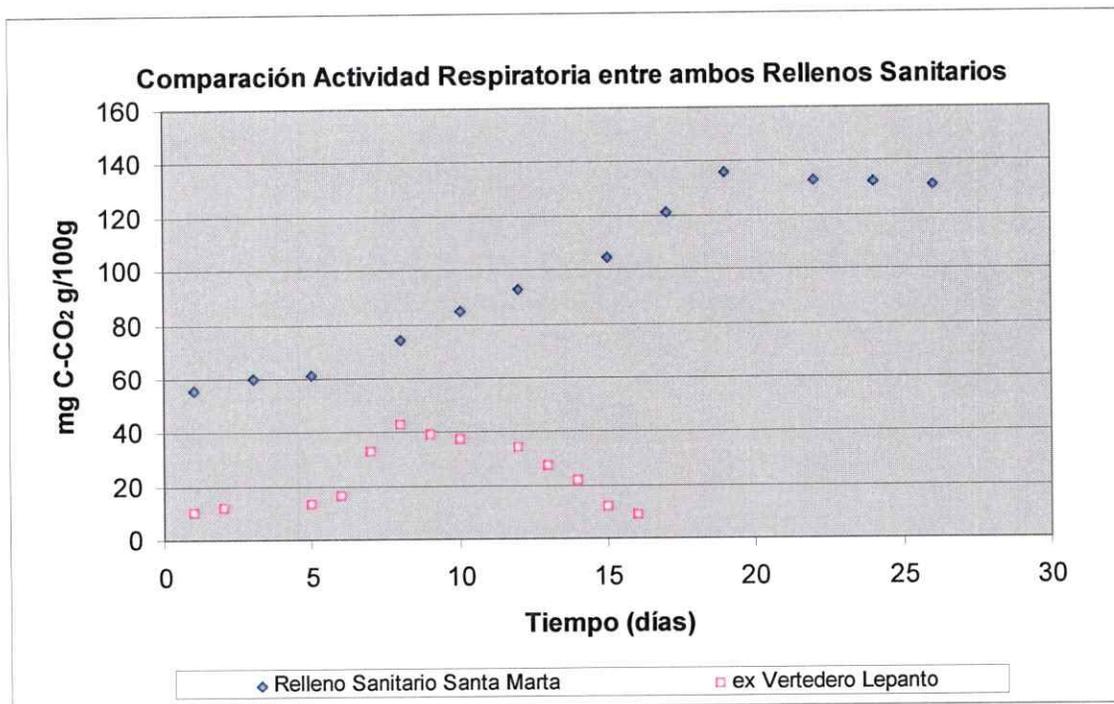
**Figura 16.** Resultados Análisis Residuos Degradados en ex Vertedero Lepanto. Las muestras corresponden al promedio de los datos a distintas profundidades, encontrados en cada una de las 3 calicatas realizadas.

Al comparar ambos Rellenos Sanitarios, se denota que no existe diferencia significativa entre las medias de ambos resultados, pues resultan con valores mayores a 0,05 para materia orgánica y porcentaje de humedad (Anexo, Tabla 4).

### 3.5 Determinación de la Actividad Respiratoria

La cantidad de CO<sub>2</sub> emitido por la degradación de materia orgánica del Relleno Sanitario Santa Marta, comienza a descomponerse en forma paulatina logrando emisiones de hasta 138 mg CO<sub>2</sub> en 100 g de materia obtenidos al cabo de 20 días. Y luego se mantiene en forma constante. El gas generado por los residuos del Relleno Sanitario Santa Marta se caracteriza por presentar mayor caudal de gas emitido y por su mayor persistencia en el tiempo con respecto a lo ocurrido en el ex Vertedero Lepanto (Figura 17).

En el ex vertedero Lepanto se observo un desprendimiento de CO<sub>2</sub> inicial bastante menor y mucho más rápido que en Relleno Sanitario Santa Marta, pero en menor tiempo, logrando la mayor emisión de 44 mg CO<sub>2</sub> a los 8 días de incubación. La producción en el tiempo forma una curva en campana, disminuyendo hasta llegar a cero al cabo de 16 días (Figura 17).



**Figura 17.** Comparación desprendimiento de CO<sub>2</sub> en 100g de muestra seca de ambos Rellenos Sanitarios. La cantidad de CO<sub>2</sub> emitido por la degradación de materia orgánica del Relleno Sanitario Santa Marta, comienza a descomponerse en forma paulatina logrando emisiones de hasta 138 mg CO<sub>2</sub> en 100 g de materia obtenidos al cabo de 20 días, luego se mantuvo en forma constante. En cambio en ex Vertedero Lepanto se observó un desprendimiento de CO<sub>2</sub> inicial bastante menor y mucho más rápido que en Relleno Sanitario Santa Marta, pero en menor tiempo.

## IV. DISCUSIÓN

### 4.1 Análisis Físicoquímicos

#### 4.1.1 Temperatura y pH

Los resultados antes mencionados indican que el proceso de descomposición por las bacterias metanogénicas se lleva a cabo en un amplio rango de temperaturas, y que en ambos Rellenos Sanitarios existen tipos de bacterias adaptadas a las condiciones mesofílicas. Los lixiviados analizados para el ex vertedero Lepanto clasifican dentro del rango límite mesofílico-termofílico, alcanzando los 46 °C.

Si bien en ex vertedero Lepanto no se alcanza al rango termofílico, la temperatura es mucho más elevada que en el Relleno Sanitario Santa Marta. En la correlación de variables se evidenció que al aumentar la temperatura, el flujo disminuye, la elevada temperatura puede ser una limitación para las bacterias mesofílicas que participan en este tipo de degradación.

El nivel de pH se controla en el mismo proceso, ya que depende de las reacciones ácido-base que ocurran al interior del Relleno Sanitario. Esto se ve favorecido por la presencia de agua en el vertedero, porque facilita la presencia de los microorganismos responsables de la degradación anaerobia en todos los puntos del vertedero, diluye concentraciones de compuestos tóxicos; regula el pH por intercambio de sustancias buffer; y facilita la difusión de nutrientes (Pacey y de Gier, 1986).

En los residuos que se encuentran en las primeras etapas de degradación por la incorporación de basura reciente, como es el caso de algunas zonas del Relleno Sanitario Santa Marta, el ácido comienza a hacer la primera actividad, reduciendo el valor del pH. Posteriormente, las bacterias metanogénicas utilizan estos ácidos y el pH tiende a un valor neutro. Esto fue detectado en lixiviados de pozo D62. Los valores encontrados en forma global, con rangos entre 6 y 7, son correspondientes a la edad de los residuos en el Relleno Sanitario Santa Marta entre los 5-10 años (Tabla 1, página 5). El pH óptimo para la fermentación, en la fase anaeróbica es casi neutro entre 7,0 y 7,5; aunque la formación de metano puede darse en el rango de 6,5 a 8,0 (Trejo, 1997).

Las tres etapas: HIDRÓLISIS, ACIDOGÉNESIS y METANOGÉNESIS se pueden estar dando en forma simultánea en Relleno Sanitario Santa Marta, por la heterogeneidad de los residuos y la variada degradación existente.

A medida que la edad de la basura degradada del Relleno Sanitario aumenta, también lo hace su pH. Esto se indicó al presentar un pH en torno a 8, que se considera en correspondencia a valores de edad del generado para residuos con edad mayor a 20 años (Tabla 1). Por lo tanto, esto explica la correlación existente; a medida que aumenta el pH disminuirá la producción de biogás. De acuerdo al valor de el pH, ex el Vertedero Lepanto se encontraría en fase III de degradación de los residuos, correspondientes a la última fase metanogénica.

En ambos rellenos sanitarios se presentaron oscilaciones que mantienen condiciones óptimas de temperatura y pH para el crecimiento bacteriano, y con una generación estabilizada de las condiciones por la acción de los microorganismos que interactúan en la formación de metano.

#### **4.1.2 Degradabilidad**

Los resultados obtenidos de la relación DBO/DQO dan cuenta de una degradabilidad altísima en el Relleno Sanitario Santa Marta. Esto evidencia una alta carga orgánica e indica la característica de un lixiviado joven o fresco, acorde con la data de degradación de la basura.

La degradabilidad en el ex vertedero Lepanto, medida como la relación de  $DBO_5/DQO$  cercana a 0,2 muestra una biodegradabilidad más alta de lo esperada, de acuerdo a la edad de la basura. De acuerdo a la correspondencia de pH y edad de los residuos, los resultados obtenidos indicarían una degradabilidad en Fase II con una carga orgánica media.

»

## 4.2 Producción de Biogás

Ambos Rellenos Sanitarios tienen un comportamiento muy desigual. Las distintas variables tienen diferentes comportamientos, a excepción de los sólidos suspendidos totales, pues es posible que este indicador se vaya acumulando con el tiempo en el lixiviado y por ende, no se note la diferencia entre las distintas edades de basura de un Relleno.

Al promediar el flujo de los pozos analizados, existe similitud entre los valores estudiados de ambos Rellenos Sanitarios. Esto sucede debido a que en el ex vertedero Lepanto, se modifica el flujo de tal manera de obtener el mayor flujo que entrega el pozo; en cambio en el Relleno Sanitario Santa Marta, los pozos de Biogás entregan la producción sin modificaciones e intervenciones. Sin embargo, el comportamiento no es similar al calcular la totalidad del biogás generado por cada Relleno Sanitario, pues Relleno Sanitario Santa Marta produce el doble de biogás generado en Lepanto. Es importante además considerar que la concentración de metano en el biogás no sólo depende de la fase en que se encuentre la degradación. Distintos sustratos originan distintas concentraciones de los componentes del biogás. Así, por ejemplo, la degradación de los lípidos genera un biogás con mayor concentración de metano que la degradación de la celulosa (Gendebien et al., 1992)

Al realizar una segunda prueba estadística, se corroboró que DQO, T<sup>o</sup> y DBO<sub>5</sub> son bastantes similares entre ambos Rellenos Sanitarios. Esto no correspondería a lo que se espera de un Relleno más maduro como es el caso del ex vertedero Lepanto.

Por este motivo, se realizaron pruebas de vaciamiento de pozos para determinar qué podría provocar estos valores altos, similares a los de un Relleno Joven. Así, se comprobó, a través del vaciamiento del líquido al interior de un pozo de captación, que éste permanece acumulado en el tiempo; al comenzar a extraerlo y hacer recircular los líquidos circundantes a esas zonas, las características del líquido varían, reduciendo sus valores; por otro lado, al extraer la mitad del líquido contenido al comienzo en un pozo de captación, la DQO disminuyó en paralelo aproximándose este valor a un 50%.

Al correlacionar lo sucedido en ambos Rellenos Sanitarios, se constató que a mayor concentración de  $DBO_5$ , SSV, SST y DQO en el lixiviado, mayor será la producción de biogás que se está generando. Teóricamente se puede relacionar la producción de biogás con la DQO y la  $DBO_5$ , pues las definimos como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar química y biológicamente, (en forma respectiva) un determinado sustrato, pues la producción de biogás dependerá del grado de biodegradabilidad de la materia orgánica.

Existe una disminución del Flujo de Biogás en indicadores de pH básico y temperatura más elevada, lo que concuerda con los datos estimativos de edad del generado en un Relleno Sanitario (Tabla 1).

En el modelo de regresión lineal, el flujo de biogás estaría relacionado principalmente con variables de CE,  $T^\circ$ , pH, N y SSV. Este modelo logra explicar un 75% del nivel del flujo del lixiviado, por lo tanto el porcentaje restante correspondería al efecto de otras variables, que podrían no haber sido consideradas en el estudio.

El Relleno Sanitario Santa Marta tiene lixiviados jóvenes, que presentan una alta correlación entre las variables estudiadas con la producción de Biogás, existiendo una mayor similitud entre el comportamiento de los distintos pozos.

Por su parte, el ex vertedero Lepanto presentó un comportamiento diferente en cada uno de sus pozos, algunos con un comportamiento similar al de los lixiviados del Relleno Sanitario Santa Marta. Dichos pozos pueden contener residuos más jóvenes, pues en la etapa I se encuentran residuos con una antigüedad de 10 años.

En la experiencia de vaciamiento de lixiviados de el ex Vertedero Lepanto se pudo observar cómo aumentó la concentración de metano y como disminuyo la concentración de DQO al sacar lixiviado del pozo. Este aumento se produciría porque aumentó la cobertura de succión y además, toda la materia orgánica contenida en el lixiviado es removida al extraer el líquido y, la que queda al fondo del pozo, pasa al estado gaseoso para salir como biogás generado.

Los valores de DQO, DBO<sub>5</sub>, SSV y SST se presentaron altos en ambos Rellenos Sanitarios. El carbono orgánico disponible y de reserva contribuye en forma constante al incremento de producción de biogás. Sin embargo, al extraer lixiviados de un pozo en un Relleno Sanitario maduro, los valores bajan considerablemente el contenido de DQO en el lixiviado, y presumiblemente esto vaya acompañado de una disminución de los valores de DBO<sub>5</sub>, SST y SSV, pues esta concentración no determina la velocidad en la que se contribuirá a la producción de metano.

El flujo de Biogás se puede explicar a través del carbono orgánico disponible indicado por la concentración de DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, SSV.

#### **4.3 Análisis Degradación Materia Orgánica**

Las diversas condiciones encontradas en ambos Rellenos Sanitarios se deben fundamentalmente a la distinta composición de los residuos depositados en cada zona. La materia orgánica cuantificada es una fracción que considera la degradabilidad de los distintos desechos; la que queda aún por degradar corresponde a la de media y lenta degradabilidad.

Los análisis realizados a los residuos degradados del Relleno Sanitario Santa Marta presentaron variedad en los resultados obtenidos, el porcentaje de humedad y materia orgánica corresponderían a amplias zonas donde la basura se mezcla, por lo tanto los resultados encontrados constituyen un promedio de los distintos estratos en las calicatas, lo que se refleja en las muestras analizadas a diferentes profundidades.

Así, se pudo evidenciar cómo en los distintos estratos se modifican estos parámetros y varía la carga orgánica. A medida que aumentó la profundidad, la muestra presentó mayor contenido de humedad y materia orgánica. La zona más profunda posee mayor humedad por acumulación de lixiviados, lo que permite un mayor intercambio y mejores condiciones para las descomposiciones y reacciones bioquímicas.

La muestra 2 de el ex Vertedero Lepanto corresponde a la etapa I del mismo, mientras que las otras dos muestras corresponden a la etapa II, esta etapa de el ex Vertedero contiene basura con una data entre los 7 y 14 años de antigüedad a diferencia de la etapa I que tiene basura de hasta 30 años o más. Así la variación de los datos entre las diferentes zonas estudiadas se explicaría por la edad de los residuos a degradar y por la disponibilidad de materia orgánica. La muestra 2 tiene residuos mucho más antiguos, lo que implica directamente un aumento en el porcentaje de humedad y un menor contenido de materia orgánica presente.

Al comparar los promedios de los porcentajes de materia orgánica y humedad entre ambos Rellenos Sanitarios se observa que no existe una diferencia significativa, pues ambos tienen materia orgánica por degradar, pero en diferentes etapas y a distinta velocidad, esto queda demostrado al observar el comportamiento de desprendimiento de CO<sub>2</sub> en ambos Rellenos Sanitarios.

Es importante considerar que la velocidad de degradación de los residuos se ve favorecida por el mayor contenido en humedad de los mismos (Christensen et al, 1996).

#### **4.4 Determinación de la Actividad Respiratoria**

Los niveles observados indicarían que el material orgánico fácilmente disponible en el ex vertedero Lepanto es menor que el del Relleno Sanitario Santa Marta.

Claramente el Relleno Sanitario Santa Marta posee un gran potencial de producción de biogás y por un tiempo prolongado, en cambio el ex vertedero Lepanto posee proyecciones cortas de potenciar la materia por degradar que aún queda.

En condiciones normales, la velocidad de descomposición, medida por la producción de biogás, llega a su cima dentro de los primeros años y después baja lentamente, continuando en muchos casos durante periodos de hasta 15 años posterior a la etapa de cierre.

Por lo tanto, son la cantidad total de residuos sólidos, el porcentaje de materia orgánica contenida en éste y su degradabilidad, lo que condiciona en gran medida la cantidad total de biogás y la velocidad de generación.

## V. CONCLUSIONES

Los parámetros que permiten caracterizar la etapa y fase de un Relleno Sanitario en forma rápida son  $DBO_5$ / DQO, pH y temperatura de los lixiviados.

La producción de biogás en un Relleno Sanitario, en general, se puede explicar con variables como la DQO,  $DBO_5$ , SSV y SST.

La relación  $DBO_5$ /DQO constituye un parámetro que permite dar claridad de la fracción biodegradable y permite determinar el potencial de producción que aún queda disponible por degradar y, que en conjunto con el pH, permiten definir la fase metanogénica en la que se encuentra la producción del biogás.

Existe mayor disponibilidad de carbono lábil en el Relleno Sanitario Santa Marta que en el ex vertedero Lepanto, por tanto existe bastante materia orgánica por degradar aún, lo que determina un gran potencial de producción de biogás.

El carbono orgánico disponible y de reserva contribuye en forma constante al incremento de producción de biogás. Sin embargo, en Rellenos Sanitarios maduros, esta concentración no determina la velocidad en la que contribuirán a la producción de metano.

La cantidad de biogás producida en un Relleno Sanitario dependerá de la cantidad de desecho que queda diariamente como alimento para los microorganismos, medida como  $DBO_5$ : fracción lábil de la materia orgánica.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

**APHA**, 1992. CLESCERI, L.S, GREENBREG, A.E., TRUNSELL R.R (eds), Standard Methods for Examination of Water and Wasterwater, 18 th. Ed. Environment. Washington D.C, USA.

**CEPIS/OPS**. 2002. "Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales", Perú. <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/curso/relleno/capitulo2.html>.

**CONAMA** 1997. "Diagnostico de la Situación Actual de los Residuos Sólidos Domiciliarios". Unidad de Residuos- CONAMA R.M. Santiago, Chile.

**EI-FADEL M; FINDIKAKIS A.N.; LECKIE J.O.** 1997.Environmental Impacts of solid waste landfilling. Journal of environmental management.

**GENDEBIEN, A.; PAUWELS, M.; CONSTANT, M.;LEDRUT-DAMAMET, M.-j.; NYNS, E.-J; WILLUMSEN, H.C.; BUTSON, J.; FABRY, R. y FERRERO, G.L.** 1992 "Landfill Biogas. From Environment to Energy" Commission of the European Communities. Final report EUR 14017/1 EN, Luxemburgo.

**GUJER, W. y ZHENDER, A. J. B.** 1983. "Conversion processes in anaerobic digestion". Water Science and Technology, 15, pp.127-167.

**HAYNES, R.** 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Advances in Agronomy*. 85:221-268.

**PALMA J.** 1991. "Reducción de los tiempos de estabilización en Rellenos Sanitarios operados con Recirculación de Lixiviados Tratados, Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

**PARRA P.** 1991. "Diseño para la construcción de un Relleno Sanitario Manual", Memoria para optar al título de constructor civil de la Universidad de la Frontera. Temuco, Chile.

**PACEY, J.G.; DEGIER, J.P.** 1986 "The factors influencing landfill gas production" Proc. Conf. "Energy from Landfill Gas", Solihull, Gran Bretaña.

**ROWEL, D.L.** 1994. Soil science methods & applications. Logman Singapore Publishers Ltda.

**SOTO V.** 1985. "Estudio de Factibilidad Técnico- Económico del Aprovechamiento de Residuos Urbanos para la Obtención de Energía. BIOGAS", Tesis para optar al Título de Ingeniero Ejecución Mecánico. Universidad de la Frontera. Temuco, Chile.

**TREJO R.** 1997. "Procesamiento de la basura Urbana" Editorial Trillas, México.

**TISDALE, S. L. y NELSON, W.L.** 1970. "Fertilidad de los suelos y fertilizantes". Montaner y Simon, Barcelona, España, 760p.

**TCHOBANGLIOUS, G., H. THEISEN, S. VIGIL.** 1994. "Gestión Integral de Residuos Sólidos". Editorial Mc Graw-Hill, México.

**VARNERO, M.T.** 1990. "Microbiología de suelos: Evaluación de la actividad microbiana". Universidad de Chile, Fac. de Cs Agrarias y Forestales, Dpto de Ingeniería y Suelos. 10p.

**ZEHNDER, A. J. B.; INGVORSEN, K. y MARTI T.** 1982. "Microbiology of methane bacteria". En Anaerobic digestion: second international symposium. Elsevier biomedical Press, Amsterdam. pp. 45 – 66.

**ZINDER, S. H.** 1984. "Microbiology of anaerobic conversion of organic wastes to methane: recent developments". ASM News, 50, pp. 294 – 298.

# ANEXOS

## I. Análisis Estadístico.

### A. Análisis Degradabilidad entre Rellenos Sanitarios

Tabla 1. Prueba de Mann-Whitney.

**Rangos**

|                | Vertedero   | N   | Rango promedio | Suma de rangos |
|----------------|-------------|-----|----------------|----------------|
| degradabilidad | Lepanto     | 50  | 26,16          | 1308,00        |
|                | Santa Marta | 50  | 74,84          | 3742,00        |
|                | Total       | 100 |                |                |

**Estadísticos de contraste<sup>a</sup>**

|                           | degradabilidad |
|---------------------------|----------------|
| U de Mann-Whitney         | 33,000         |
| W de Wilcoxon             | 1308,000       |
| Z                         | -8,390         |
| Sig. asintót. (bilateral) | ,000           |

a. Variable de agrupación: Vertedero

Tabla 2. Prueba de Moses.

**Frecuencias**

|                | Vertedero                  | N   |
|----------------|----------------------------|-----|
| degradabilidad | Lepanto (Control)          | 50  |
|                | Santa Marta (Experimental) | 50  |
|                | Total                      | 100 |

**Estadísticos de contraste<sup>a,b</sup>**

|  | degradabilidad |
|--|----------------|
| Amplitud observada del grupo control Sig. (unilateral) | 56<br>,000     |
| Amplitud recortada del grupo control Sig. (unilateral) | 53<br>,000     |
| Valores atípicos recortados de cada extremo            | 2              |

a. Prueba de Moses

b. Variable de agrupación: Vertedero

Tabla 3: Análisis de correlaciones entre ambos Reellenos Sanitarios

Correlaciones

|                                 | Demanda Química de Oxígeno | Sólidos en Suspensión Totales | Cloro  | Conductividad Eléctrica | Temperatura | Nivel de Acidez o Alcalinidad | Flujo m3/hr Lixiviado | Demanda Biológica de Oxígeno | Fósforo | Níquel | Sólidos en Suspensión Volátiles |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------|--------|---------------------------------|
| Demanda Química de Oxígeno      | 1                          | ,148                          | ,001   | ,692**                  | ,430**      | ,064                          | ,357**                | ,697**                       | ,282**  | ,327** | ,392**                          |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,142                          | ,983   | ,000                    | ,000        | ,525                          | ,001                  | ,000                         | ,005    | ,001   | ,000                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |
| Sólidos en Suspensión Totales   | ,148                       | 1                             | ,003   | ,114                    | ,056        | ,166                          | ,481**                | ,074                         | ,110    | ,254*  | ,480**                          |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | 1                             | ,978   | ,260                    | ,583        | ,069                          | ,000                  | ,466                         | ,277    | ,011   | ,000                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |
| Cloro                           | ,001                       | ,003                          | 1      | ,339**                  | ,244*       | ,375**                        | ,212*                 | ,201*                        | ,309**  | ,285** | ,272**                          |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,983                          | 1      | ,001                    | ,014        | ,000                          | ,050                  | ,045                         | ,002    | ,004   | ,006                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |
| Conductividad Eléctrica         | ,692**                     | ,114                          | ,339** | 1                       | ,402**      | ,456**                        | ,078                  | ,159                         | ,570**  | ,149   | ,431**                          |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,000                          | ,001   | 1                       | ,000        | ,000                          | ,475                  | ,113                         | ,000    | ,138   | ,000                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |
| Temperatura                     | ,430**                     | ,056                          | ,244*  | ,402**                  | 1           | ,484**                        | ,283**                | ,018                         | ,424**  | ,397** | ,017                            |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,000                          | ,014   | ,000                    | ,000        | ,000                          | ,008                  | ,856                         | ,000    | ,000   | ,884                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |
| Nivel de Acidez o Alcalinidad   | ,064                       | ,166                          | ,375** | ,456**                  | ,494**      | 1                             | ,713**                | ,679**                       | ,512**  | ,032   | ,032                            |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,525                          | ,000   | ,000                    | ,000        | ,000                          | ,000                  | ,000                         | ,000    | ,750   | ,754                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |
| Flujo m3/hr Lixiviado           | ,357**                     | ,481**                        | ,212*  | ,078                    | ,293**      | ,713**                        | 1                     | ,665**                       | ,257*   | ,222*  | ,540**                          |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,001                          | ,050   | ,475                    | ,008        | ,000                          | 1                     | ,000                         | ,017    | ,040   | ,000                            |
|                                 | N                          | 88                            | 88     | 88                      | 88          | 88                            | 88                    | 88                           | 88      | 88     | 88                              |
| Demanda Biológica de Oxígeno    | ,697**                     | ,074                          | ,201*  | ,159                    | ,018        | ,679**                        | ,665**                | 1                            | ,066    | ,216*  | ,272**                          |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,000                          | ,045   | ,113                    | ,856        | ,000                          | ,000                  | ,000                         | ,516    | ,031   | ,008                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |
| Fósforo                         | ,282**                     | ,110                          | ,309** | ,570**                  | ,424**      | ,512**                        | ,257*                 | ,066                         | 1       | ,148   | ,230*                           |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,005                          | ,002   | ,000                    | ,000        | ,000                          | ,017                  | ,518                         | 1       | ,142   | ,021                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |
| Níquel                          | ,327**                     | ,254*                         | ,285** | ,149                    | ,397**      | ,032                          | ,222*                 | ,216*                        | ,148    | 1      | ,153                            |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,001                          | ,011   | ,138                    | ,040        | ,750                          | ,040                  | ,031                         | ,142    | ,031   | ,129                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |
| Sólidos en Suspensión Volátiles | ,392**                     | ,480**                        | ,272** | ,431**                  | ,017        | ,032                          | ,540**                | ,272**                       | ,230*   | ,153   | 1                               |
|                                 | Correlación de Pearson     |                               |        |                         |             |                               |                       |                              |         |        |                                 |
|                                 | Sig. (bilateral)           | ,000                          | ,006   | ,000                    | ,884        | ,754                          | ,000                  | ,006                         | ,021    | ,129   | ,153                            |
|                                 | N                          | 100                           | 100    | 100                     | 100         | 100                           | 88                    | 100                          | 100     | 100    | 100                             |

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

**Tabla 4. Prueba de Mann-Whitney para análisis de humedad y materia orgánica**

**Estadísticos de contraste<sup>b</sup>**

|                                   | Humedad           | Materia Orgánica  |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
| U de Mann-Whitney                 | 2,000             | 3,000             |
| W de Wilcoxon                     | 8,000             | 9,000             |
| Z                                 | -1,091            | -,655             |
| Sig. asintót. (bilateral)         | ,275              | ,513              |
| Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)] | ,400 <sup>a</sup> | ,700 <sup>a</sup> |

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Vertedero

No hay diferencias entre las medias (p value 0,4 y 0,7 mayores a 0,05).

**Tabla 5. Para análisis de media se utilizará el test no paramétrico U de Mann Whitney**

**Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra**

|                       | Demanda química de Oxígeno | Sólidos en suspensión Totales | Conductividad Eléctrica | Temperatura | Nivel de Acidez | Profundidad del nivel de lixiviación | Demanda Biológica de Oxígeno | Fósforo  | Nitrógeno | Sólidos en suspensión Volátiles |       |       |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------------|----------|-----------|---------------------------------|-------|-------|
| N                     | 100                        | 100                           | 100                     | 100         | 100             | 90                                   | 81                           | 100      | 100       | 100                             |       |       |
| Parámetro Media       | 1087,37                    | 189,02                        | 1231,069,00             | 7,809       | 7,7339          | 1,5511                               | 22,74                        | 10291,45 | 6,89      | 148,3                           |       |       |
| Desviación típica     | 124,266                    | 122,058                       | 1221,81,892             | 1947        | ,56909          | 33012                                | 35,204                       | 10380    | 6,48      | 160,08                          |       |       |
| Diferencia Absoluta   | ,198                       | ,154                          | ,292                    | ,129        | ,199            | ,168                                 | ,304                         | ,259     | ,357      | ,175                            | ,286  | ,175  |
| más Positiva          | ,198                       | ,154                          | ,292                    | ,094        | ,199            | ,120                                 | ,304                         | ,223     | ,357      | ,175                            | ,234  | ,175  |
| extremas Negativa     | -,160                      | -,106                         | ,209                    | -,129       | -,160           | -,168                                | -,185                        | -,259    | -,285     | ,136                            | -,286 | -,148 |
| Z de Kolmogorov-S     | 1,984                      | 1,540                         | ,920                    | 1,289       | 1,989           | 1,677                                | 2,888                        | 2,333    | 3,566     | ,749                            | 2,858 | 1,747 |
| Sig. asintót. (bilate | ,001                       | ,017                          | ,000                    | ,072        | ,001            | ,007                                 | ,000                         | ,000     | ,000      | ,004                            | ,000  | ,004  |

a La distribución de contraste es la Normal.

b Se han calculado a partir de los datos.

Todos los valores p son menores a 0,05, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de normalidad en la distribución de los datos.

## Prueba de medias

### Estadísticos de contraste

|                           | DQO1    | SST1  | CL-1   | CE1    | T°1    | Ph1   | Prof<br>lix.1 | Flujo<br>m3/hr1 | DBO1   | Pt1  | Nkjdl1 | SSV1   |
|---------------------------|---------|-------|--------|--------|--------|-------|---------------|-----------------|--------|------|--------|--------|
| U de Mann-Whitney         | 542,000 | 1190  | 2,000  | 41,00  | 841,0  | 106   | ,000          | 700,000         | 275,0  | 75   | 425,0  | 500,00 |
| W de Wilcoxon             | 1917,0  | 2465  | 1277   | 1316   | 2116   | 1381  | 1035          | 1735,0          | 1550   | ***  | 1700   | 1775,0 |
| Z                         | -4,192  | -,414 | -8,604 | -8,336 | -2,821 | -7,89 | -8,18         | -,447           | -6,730 | -8,1 | -5,696 | -5,177 |
| Sig. asintót. (bilateral) | ,000    | ,679  | ,000   | ,000   | ,005   | ,000  | ,000          | ,655            | ,000   | ,000 | ,000   | ,000   |

a. Variable de agrupación: vertedero

SST y flujo no poseen medias estadísticamente diferentes. Las demás sí.

Tabla 6. Análisis de media entre pozos para Lepanto

### ANOVA

|                                    |              | Suma de<br>cuadrados | gl | Media<br>cuadrática | F       | Sig. |
|------------------------------------|--------------|----------------------|----|---------------------|---------|------|
| Demanda Química de<br>Oxígeno      | Inter-grupos | 1,02E+010            | 7  | 1,5E+009            | 219,886 | ,000 |
|                                    | Intra-grupos | 171715875            | 26 | 6604456,7           |         |      |
|                                    | Total        | 1,03E+010            | 33 |                     |         |      |
| Sólidos en Suspensión<br>Totales   | Inter-grupos | 22184,428            | 7  | 3169,204            | ,564    | ,778 |
|                                    | Intra-grupos | 146137,794           | 26 | 5620,684            |         |      |
|                                    | Total        | 168322,222           | 33 |                     |         |      |
| Cloro                              | Inter-grupos | 728210,363           | 7  | 104030,052          | 2,149   | ,074 |
|                                    | Intra-grupos | 1258756,8            | 26 | 48413,722           |         |      |
|                                    | Total        | 1986967,1            | 33 |                     |         |      |
| Conductividad Eléctrica            | Inter-grupos | 211453647            | 7  | 30207664            | 24,041  | ,000 |
|                                    | Intra-grupos | 32669000             | 26 | 1256500,0           |         |      |
|                                    | Total        | 244122647            | 33 |                     |         |      |
| Temperatura                        | Inter-grupos | 50,281               | 7  | 7,183               | 37,932  | ,000 |
|                                    | Intra-grupos | 4,924                | 26 | ,189                |         |      |
|                                    | Total        | 55,205               | 33 |                     |         |      |
| Nivel de Acidez o<br>Alcalinidad   | Inter-grupos | ,137                 | 7  | ,020                | 4,553   | ,002 |
|                                    | Intra-grupos | ,112                 | 26 | ,004                |         |      |
|                                    | Total        | ,248                 | 33 |                     |         |      |
| Profundidad del Lixiviado          | Inter-grupos | 418,141              | 7  | 59,734              | 3E+032  | ,000 |
|                                    | Intra-grupos | ,000                 | 26 | ,000                |         |      |
|                                    | Total        | 418,141              | 33 |                     |         |      |
| Flujo m3/hr Lixiviado              | Inter-grupos | 1569,531             | 7  | 224,219             | 23,084  | ,000 |
|                                    | Intra-grupos | 252,541              | 26 | 9,713               |         |      |
|                                    | Total        | 1822,072             | 33 |                     |         |      |
| Demanda Biológica de<br>Oxígeno    | Inter-grupos | 956976047            | 7  | 1,4E+008            | .       | .    |
|                                    | Intra-grupos | ,000                 | 26 | ,000                |         |      |
|                                    | Total        | 956976047            | 33 |                     |         |      |
| Fósforo                            | Inter-grupos | 44536,685            | 7  | 6362,384            | 5E+032  | ,000 |
|                                    | Intra-grupos | ,000                 | 26 | ,000                |         |      |
|                                    | Total        | 44536,685            | 33 |                     |         |      |
| Nitrógeno                          | Inter-grupos | 29601,441            | 7  | 4226,777            | .       | .    |
|                                    | Intra-grupos | ,000                 | 26 | ,000                |         |      |
|                                    | Total        | 29601,441            | 33 |                     |         |      |
| Sólidos en Suspensión<br>Volátiles | Inter-grupos | 174092,235           | 7  | 24870,319           | .       | .    |
|                                    | Intra-grupos | ,000                 | 26 | ,000                |         |      |
|                                    | Total        | 174092,235           | 33 |                     |         |      |

Todos son diferentes al 1; excepto cloro que es al 10%, y SST no tiene.

**Tabla 7. Subconjuntos homogéneos análisis ex vertedero Lepanto**

**Demanda Química de Oxígeno**

HSD de Tukey<sup>a,b</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |          |          |          |          |
|-------|---|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
|       |   | 1                           | 2        | 3        | 4        | 5        |
| 3     | 4 | 24200,00                    |          |          |          |          |
| 7     | 5 |                             | 37510,00 |          |          |          |
| 8     | 4 |                             | 38500,00 |          |          |          |
| 6     | 5 |                             | 39510,00 |          |          |          |
| 5     | 4 |                             | 41362,50 | 41362,50 |          |          |
| 4     | 4 |                             |          | 45625,00 |          |          |
| 9     | 4 |                             |          |          | 65725,00 |          |
| 10    | 4 |                             |          |          |          | 84200,00 |
| Sig.  |   | 1,000                       | ,398     | ,280     | 1,000    | 1,000    |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,211.
- b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Sólidos en Suspensión Totales**

HSD de Tukey<sup>a,b</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |
|-------|---|-----------------------------|
|       |   | 1                           |
| 3     | 4 | 131,17                      |
| 4     | 4 | 150,00                      |
| 6     | 5 | 170,47                      |
| 10    | 4 | 183,58                      |
| 9     | 4 | 194,00                      |
| 8     | 4 | 201,83                      |
| 5     | 4 | 201,83                      |
| 7     | 5 | 208,13                      |
| Sig.  |   | ,806                        |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,211.
- b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Cloro**

HSD de Tukey<sup>a,b</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |
|-------|---|-----------------------------|
|       |   | 1                           |
| 5     | 4 | 4043,41                     |
| 3     | 4 | 4202,37                     |
| 4     | 4 | 4209,89                     |
| 6     | 5 | 4251,16                     |
| 8     | 4 | 4302,47                     |
| 10    | 4 | 4455,53                     |
| 7     | 5 | 4459,76                     |
| 9     | 4 | 4499,49                     |
| Sig.  |   | ,091                        |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,211.
- b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Conductividad Eléctrica**

HSD de Tukey<sup>a,b</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |          |          |
|-------|---|-----------------------------|----------|----------|
|       |   | 1                           | 2        | 3        |
| 3     | 4 | 32575,00                    |          |          |
| 5     | 4 |                             | 37550,00 |          |
| 4     | 4 |                             | 37675,00 |          |
| 6     | 5 |                             | 37840,00 |          |
| 7     | 5 |                             | 38660,00 |          |
| 8     | 4 |                             | 38700,00 |          |
| 10    | 4 |                             |          | 41300,00 |
| 9     | 4 |                             |          | 41400,00 |
| Sig.  |   | 1,000                       | ,806     | 1,000    |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,211.
- b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

### Temperatura

HSD de Tukey<sup>a,b</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |        |        |        |        |
|-------|---|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
|       |   | 1                           | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 9     | 4 | 41,875                      |        |        |        |        |
| 10    | 4 |                             | 43,425 |        |        |        |
| 5     | 4 |                             | 43,925 | 43,925 |        |        |
| 4     | 4 |                             | 44,275 | 44,275 |        |        |
| 6     | 5 |                             | 44,380 | 44,380 |        |        |
| 3     | 4 |                             |        | 44,850 | 44,850 |        |
| 7     | 5 |                             |        |        | 45,720 | 45,720 |
| 8     | 4 |                             |        |        |        | 46,025 |
| Sig.  |   | 1,000                       | ,063   | ,078   | ,113   | ,968   |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,211.
- b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

### Nivel de Acidez o Alcalinidad

HSD de Tukey<sup>a,b</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |        |
|-------|---|-----------------------------|--------|
|       |   | 1                           | 2      |
| 10    | 4 | 8,0875                      |        |
| 9     | 4 | 8,1385                      | 8,1385 |
| 6     | 5 | 8,1520                      | 8,1520 |
| 3     | 4 | 8,2075                      | 8,2075 |
| 7     | 5 |                             | 8,2480 |
| 8     | 4 |                             | 8,2500 |
| 4     | 4 |                             | 8,2650 |
| 5     | 4 |                             | 8,2725 |
| Sig.  |   | ,181                        | ,099   |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

- a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,211.
- b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Profundidad del Lixiviado**

HSD de Tukey<sup>a,b</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |         |         |         |         |         |         |         |
|-------|---|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       |   | 1                           | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
| 4     | 4 | 12,2500                     |         |         |         |         |         |         |         |
| 5     | 4 |                             | 14,8000 |         |         |         |         |         |         |
| 6     | 5 |                             |         | 15,7000 |         |         |         |         |         |
| 9     | 4 |                             |         |         | 19,3500 |         |         |         |         |
| 3     | 4 |                             |         |         |         | 21,2500 |         |         |         |
| 7     | 5 |                             |         |         |         |         | 21,5000 |         |         |
| 8     | 4 |                             |         |         |         |         |         | 21,7000 |         |
| 10    | 4 |                             |         |         |         |         |         |         | 22,0000 |
| Sig.  |   | 1,000                       | 1,000   | 1,000   | 1,000   | 1,000   | 1,000   | 1,000   | 1,000   |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,211.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los g niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Flujo m3/hr Lixiviado**

HSD de Tukey<sup>a,b</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |       |       |       |
|-------|---|-----------------------------|-------|-------|-------|
|       |   | 1                           | 2     | 3     | 4     |
| 6     | 5 | ,00                         |       |       |       |
| 7     | 5 | ,00                         |       |       |       |
| 8     | 4 | 2,43                        |       |       |       |
| 9     | 4 | 5,64                        | 5,64  |       |       |
| 5     | 4 |                             | 9,61  | 9,61  |       |
| 4     | 4 |                             | 10,33 | 10,33 |       |
| 10    | 4 |                             |       | 13,04 |       |
| 3     | 4 |                             |       |       | 20,91 |
| Sig.  |   | ,193                        | ,393  | ,748  | 1,000 |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,211.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Fósforo

HSD de Tukey<sup>a,b</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |       |       |       |       |        |        |        |
|-------|---|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
|       |   | 1                           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6      | 7      | 8      |
| 4     | 4 | 59,50                       |       |       |       |       |        |        |        |
| 5     | 4 |                             | 68,10 |       |       |       |        |        |        |
| 9     | 4 |                             |       | 81,00 |       |       |        |        |        |
| 10    | 4 |                             |       |       | 89,10 |       |        |        |        |
| 7     | 5 |                             |       |       |       | 92,40 |        |        |        |
| 3     | 4 |                             |       |       |       |       | 130,00 |        |        |
| 8     | 4 |                             |       |       |       |       |        | 138,00 |        |
| 6     | 5 |                             |       |       |       |       |        |        | 168,00 |
| Sig.  |   | 1,000                       | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000  | 1,000  | 1,000  |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4,211.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 8. Análisis de medias de los pozos para Santa Marta.

ANOVA

|                                 |              | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F       | Sig. |
|---------------------------------|--------------|-------------------|----|------------------|---------|------|
| Demanda Química de Oxígeno      | Inter-grupos | 2,73E+010         | 8  | 3,4E+009         | 173,820 | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 706234000         | 36 | 19617611         |         |      |
|                                 | Total        | 2,80E+010         | 44 |                  |         |      |
| Sólidos en Suspensión Totales   | Inter-grupos | 849252,444        | 8  | 106156,556       | 17,237  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 221714,800        | 36 | 6158,744         |         |      |
|                                 | Total        | 1070967,2         | 44 |                  |         |      |
| Cloro                           | Inter-grupos | 1907937,6         | 8  | 238492,200       | 1,385   | ,236 |
|                                 | Intra-grupos | 6200271,6         | 36 | 172229,767       |         |      |
|                                 | Total        | 8108209,2         | 44 |                  |         |      |
| Conductividad Eléctrica         | Inter-grupos | 367595111         | 8  | 45949389         | 19,659  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 84144000          | 36 | 2337333,3        |         |      |
|                                 | Total        | 451739111         | 44 |                  |         |      |
| Temperatura                     | Inter-grupos | 187,675           | 8  | 23,459           | 434,433 | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | 1,944             | 36 | ,054             |         |      |
|                                 | Total        | 189,619           | 44 |                  |         |      |
| Nivel de Acidez o Alcalinidad   | Inter-grupos | 11,195            | 8  | 1,399            | 337,094 | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | ,149              | 36 | ,004             |         |      |
|                                 | Total        | 11,344            | 44 |                  |         |      |
| Profundidad del Lixiviado       | Inter-grupos | ,577              | 8  | ,072             | 9E+032  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | ,577              | 44 |                  |         |      |
| Flujo m3/hr Lixiviado           | Inter-grupos | 80935,878         | 8  | 10116,985        |         |      |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 80935,878         | 44 |                  |         |      |
| Demanda Biológica de Oxígeno    | Inter-grupos | 1,17E+010         | 8  | 1,5E+009         |         |      |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 1,17E+010         | 44 |                  |         |      |
| Fósforo                         | Inter-grupos | 9466,178          | 8  | 1183,272         | 1E+033  | ,000 |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 9466,178          | 44 |                  |         |      |
| Nitrógeno                       | Inter-grupos | 6302340,0         | 8  | 787792,500       |         |      |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 6302340,0         | 44 |                  |         |      |
| Sólidos en Suspensión Volátiles | Inter-grupos | 365054,444        | 8  | 45631,806        |         |      |
|                                 | Intra-grupos | ,000              | 36 | ,000             |         |      |
|                                 | Total        | 365054,444        | 44 |                  |         |      |

**Tabla 9: Subconjuntos homogéneos**

**Demanda Química de Oxígeno**

HSD de Tukey<sup>a</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |          |
|-------|---|-----------------------------|----------|
|       |   | 1                           | 2        |
| 11    | 5 | 10380,00                    |          |
| 17    | 5 | 11220,00                    |          |
| 16    | 5 | 12980,00                    |          |
| 13    | 5 | 13120,00                    |          |
| 15    | 5 | 13290,00                    |          |
| 18    | 5 | 13440,00                    |          |
| 19    | 5 | 15530,00                    |          |
| 14    | 5 | 16140,00                    |          |
| 12    | 5 |                             | 91420,00 |
| Sig.  |   | ,517                        | 1,000    |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

**Sólidos en Suspensión Totales**

HSD de Tukey<sup>a</sup>

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |        |        |
|-------|---|-----------------------------|--------|--------|
|       |   | 1                           | 2      | 3      |
| 18    | 5 | 64,40                       |        |        |
| 19    | 5 | 77,80                       |        |        |
| 16    | 5 | 89,40                       |        |        |
| 11    | 5 | 116,40                      | 116,40 |        |
| 17    | 5 | 149,20                      | 149,20 |        |
| 13    | 5 | 164,60                      | 164,60 |        |
| 15    | 5 | 166,80                      | 166,80 |        |
| 12    | 5 |                             | 273,20 |        |
| 14    | 5 |                             |        | 531,80 |
| Sig.  |   | ,513                        | ,069   | 1,000  |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

### Cloro

HSD de Tukéy<sup>a</sup>

| Pozos | N | Subconjunto<br>para alfa = .05 |
|-------|---|--------------------------------|
|       |   | 1                              |
| 16    | 5 | 3404,00                        |
| 12    | 5 | 3438,20                        |
| 13    | 5 | 3556,40                        |
| 15    | 5 | 3645,20                        |
| 19    | 5 | 3649,00                        |
| 18    | 5 | 3666,80                        |
| 11    | 5 | 3739,00                        |
| 17    | 5 | 3781,20                        |
| 14    | 5 | 4145,40                        |
| Sig.  |   | ,143                           |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjunto homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

### Conductividad Eléctrica

HSD de Tukéy

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |          |          |          |
|-------|---|-----------------------------|----------|----------|----------|
|       |   | 1                           | 2        | 3        | 4        |
| 17    | 5 | 26360,00                    |          |          |          |
| 15    | 5 | 26620,00                    |          |          |          |
| 11    | 5 | 27440,00                    | 27440,00 |          |          |
| 13    | 5 | 29420,00                    | 29420,00 | 29420,00 |          |
| 19    | 5 |                             | 29900,00 | 29900,00 |          |
| 14    | 5 |                             |          | 30720,00 |          |
| 16    | 5 |                             |          | 30880,00 |          |
| 18    | 5 |                             |          | 31520,00 |          |
| 12    | 5 |                             |          |          | 36200,00 |
| Sig.  |   | ,068                        | ,246     | ,444     | 1,000    |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

### Temperatura

HSD de Tukéy

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |        |        |        |
|-------|---|-----------------------------|--------|--------|--------|
|       |   | 1                           | 2      | 3      | 4      |
| 18    | 5 | 32,760                      |        |        |        |
| 11    | 5 | 33,140                      |        |        |        |
| 14    | 5 |                             | 33,960 |        |        |
| 12    | 5 |                             | 34,120 |        |        |
| 13    | 5 |                             | 34,120 |        |        |
| 15    | 5 |                             | 34,160 |        |        |
| 17    | 5 |                             | 34,300 |        |        |
| 16    | 5 |                             |        | 37,260 |        |
| 19    | 5 |                             |        |        | 39,520 |
| Sig.  |   | ,228                        | ,361   | 1,000  | 1,000  |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

### Nivel de Acidez o Alcalinidad

HSD de Tukéy

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |        |        |        |
|-------|---|-----------------------------|--------|--------|--------|
|       |   | 1                           | 2      | 3      | 4      |
| 12    | 5 | 5,9040                      |        |        |        |
| 17    | 5 |                             | 7,3140 |        |        |
| 14    | 5 |                             | 7,3600 | 7,3600 |        |
| 15    | 5 |                             | 7,3980 | 7,3980 |        |
| 18    | 5 |                             | 7,4100 | 7,4100 |        |
| 11    | 5 |                             | 7,4160 | 7,4160 |        |
| 13    | 5 |                             |        | 7,4820 |        |
| 19    | 5 |                             |        |        | 7,6240 |
| 16    | 5 |                             |        |        | 7,6400 |
| Sig.  |   | 1,000                       | ,264   | ,100   | 1,000  |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

**Profundidad del Lixiviado**

HSD de Tukey

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |   | 1                           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 14    | 5 | ,1800                       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 19    | 5 |                             | ,2300 |       |       |       |       |       |       |       |
| 17    | 5 |                             |       | ,2500 |       |       |       |       |       |       |
| 12    | 5 |                             |       |       | ,2600 |       |       |       |       |       |
| 16    | 5 |                             |       |       |       | ,3100 |       |       |       |       |
| 15    | 5 |                             |       |       |       |       | ,3300 |       |       |       |
| 11    | 5 |                             |       |       |       |       |       | ,3500 |       |       |
| 18    | 5 |                             |       |       |       |       |       |       | ,4800 |       |
| 13    | 5 |                             |       |       |       |       |       |       |       | ,5500 |
| Sig.  |   | 1,000                       | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.

**Fósforo**

HSD de Tukey

| Pozos | N | Subconjunto para alfa = .05 |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |   | 1                           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 14    | 5 | 36,80                       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 11    | 5 |                             | 38,70 |       |       |       |       |       |       |       |
| 17    | 5 |                             |       | 39,80 |       |       |       |       |       |       |
| 15    | 5 |                             |       |       | 41,60 |       |       |       |       |       |
| 13    | 5 |                             |       |       |       | 54,60 |       |       |       |       |
| 16    | 5 |                             |       |       |       |       | 58,30 |       |       |       |
| 18    | 5 |                             |       |       |       |       |       | 62,60 |       |       |
| 12    | 5 |                             |       |       |       |       |       |       | 66,30 |       |
| 19    | 5 |                             |       |       |       |       |       |       |       | 81,70 |
| Sig.  |   | 1,000                       | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,000.