

# SEGUIMIENTO DE UNA CELDA EXPERIMENTAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

SANDRA CRISTINA ARIAS\*  
RUBÉN ALBERTO AGUDELO\*\*

## RESUMEN

La generación de residuos sólidos urbanos es una consecuencia de la realización de las diferentes actividades humanas que se desarrollan de manera cotidiana en un municipio. Del adecuado manejo y disposición que se realice de estos residuos depende la magnitud del impacto ambiental local o incluso regional que se genere.

En este estudio se diseñó un experimento que permitió hacerle seguimiento, durante seis meses, a variables relacionadas con la descomposición y estabilización de los residuos sólidos urbanos. Un factor relevante en la degradación del material orgánico es la exposición a la precipitación; por esta razón se trabajó en dos experimentos con las mismas condiciones de conformación, pero uno sujeto a la incidencia de la lluvia y otro protegido de ella. Para este caso se pudo apreciar que los fenómenos de degradación de la materia orgánica se relacionan con las condiciones ambientales, específicamente con la precipitación a la cual queda expuesta la celda. Pero ésta no es la única variable que condiciona el proceso.

**PALABRAS CLAVE:** lixiviados; residuos sólidos; degradación de materia orgánica; celda de residuos sólidos.

## ABSTRACT

The urban solid wastes generation is a consequence of the human beings' different activities carried out daily in a municipality. The magnitude of the environmental impact generated is local or regional, depending on how the waste management and disposal are carried out.

An experiment was designed in order to study, during six months, variables related to the decomposition and stabilization of the urban solid wastes, some of them dealing with the waste and others with the leachate. From the beginning of the experimentation it was specified that there is an outstanding factor in the observed waste, and it is the exposal to rainfall. Therefore, two experiments with the same conformation conditions, but one subjected to the rain incidence, and other protected by a cover were carried out.

**KEY WORDS:** leachate; solid waste; organic mater degradation; solid wastes, cell.

---

\* Ingeniera Ambiental, EIA. Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia. Directora de Ingeniería Ambiental, EIA. Grupo de Investigación Gabis -Gestión del Ambiente para el Bienestar Social-, EIA. [ingambiental@eia.edu.co](mailto:ingambiental@eia.edu.co)

\*\* Ingeniero Sanitario MSc. Profesor Universidad de Antioquia. Adscrito al grupo GIGA. [ragudelo@udea.edu.co](mailto:ragudelo@udea.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

Existen diferentes técnicas para el tratamiento final de los residuos sólidos urbanos, como incineración, plasma, pirólisis, termólisis y formación de compost o bioabono mediante el tratamiento del material orgánico. Sin embargo, por razones económicas y posibilidades tecnológicas, para Colombia la principal opción técnica viable es, como lo ha sido, el relleno sanitario, aunque en las comunidades no se tiene la mejor aceptación de proyectos de este tipo.

El relleno sanitario es una técnica que consiste en el cubrimiento diario de los residuos sólidos dispuestos en un lugar específico y con unas dimensiones específicas formando de esa manera la celda. Esta debe contar con sistemas de recolección de lixiviados y redes para la conducción de gases, y desde su diseño se hace necesario considerar todas las etapas de su ciclo de vida: adecuación, operación, clausura y posclausura. Es importante también en la fase de diseño buscar mediante alternativas técnicas que el impacto ambiental producido sea mínimo y sus consecuencias sobre el suelo, aire, agua y la comunidad estén, como en cualquier otra actividad, definidas y controladas para cumplir con la legislación relacionada.

El proceso de degradación biológica<sup>1</sup> de la materia orgánica se realiza principalmente por vía anaeróbica, que se divide en dos etapas que constituyen el proceso general de degradación: etapa hidrolítica y etapa fermentativa (fase acetogénica y fase metanogénica). Esta digestión anaerobia también se llama gasificación o biometanización. Este proceso presenta ciertas características que lo diferencian del aerobio, entre ellas están:

- Se elimina la materia volátil en gran porcentaje.

- Los sólidos totales biológicos generados son bajos.
- Hay destrucción de organismos patógenos cuando se alcanzan las condiciones termofílicas.
- Se obtiene energía en forma de biogás.

Los residuos sólidos urbanos, sobre todo las fracciones orgánicas, al ser compactados por maquinaria pesada liberan de su interior agua y líquidos orgánicos, los cuales se escurren hacia la base de la celda. La basura, que actúa en cierta medida como una esponja, recupera lentamente parte de estos líquidos al cesar la presión de la maquinaria. Pero la descomposición anaeróbica pronto comienza a actuar en un relleno sanitario, lo que conduce a producir cambios biológicos, físicos y químicos en la materia orgánica, primero de sólido a líquido y luego de líquido a gas, lo cual hace que las basuras queden saturadas de líquido. Esta situación, sumada al aporte de aguas lluvias y de escorrentía que se infiltran en el relleno, desencadena un transporte de líquidos a través de los desechos arrastrando consigo sólidos en suspensión y compuestos orgánicos en solución de alta carga contaminante para acuíferos y aguas superficiales.

La producción de lixiviados, es decir, de los "líquidos que se infiltran a través de los residuos sólidos y que extraen materiales disueltos o en suspensión"<sup>2</sup> es el principal impacto negativo generado en la operación de los rellenos sanitarios, pues pueden entrar en contacto con las aguas superficiales, contaminándolas y ocasionando la pérdida de su calidad física, química y biológica. En el caso en que los lixiviados se infiltren y lleguen a las aguas subterráneas, la contaminación de éstas es por largos periodos de tiempo y puede permanecer sin detectarse, a menos que el agua subterránea se extraiga para distintos usos.

1 RITA, Fábio (2002). Desempenho de um reator UASB em escala piloto para o tratamento anaeróbico de líquidos percolados de resíduos sólidos urbanos. En: <http://www2.enq.ufsc.br/teses/m090.pdf>

2 PINEDA M. Samuel Ignacio. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. LIME-Acodal, 1998.



Entre los diversos factores que afectan tanto la cantidad como la composición de los lixiviados pueden destacarse la composición de los residuos sólidos, la naturaleza del material de cobertura, el grado de compactación de los residuos al ser dispuestos, las condiciones meteorológicas y la edad del relleno.

Las situaciones descritas conducen a pensar en la relevancia de continuar con la investigación de los procesos que se desarrollan en la operación de un relleno sanitario adaptada a las condiciones propias de los rellenos del medio colombiano y de realizar un seguimiento de la producción de lixiviado y la degradación de la materia orgánica.

## METODOLOGÍA

La investigación buscó identificar los cambios generados en una celda experimental de residuos sólidos urbanos, dada la degradación aerobia y anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos dispuestos, y proponer los elementos para un modelo de gestión de variables ambientales.

La degradación de los residuos sólidos no separados en la fuente, en condiciones anaerobias, puede tardarse años según las condiciones de temperatura, humedad y compactación; no obstante, para la realización de este proyecto se decidió considerar un período de seis meses, para conocer las fases iniciales del proceso de degradación.

Para la construcción de las celdas experimentales se utilizaron dos canecas de Rotoplast de polietileno lineal de baja densidad, con capacidad de 1.000 litros cada una. En ambos recipientes se realizaron cinco perforaciones de 1¼ de pulgada de diámetro, tres de ellas en la pared, en línea recta cada 30 cm a partir del fondo, para usarse como punto de muestreo, y las otras dos en el fondo, para lograr la evacuación de lixiviados.

A los orificios dispuestos para realizar los muestreos en diferentes alturas de la celda se empalmó tubería de PVC de 40 cm de longitud y 1¼ de pulgada de diámetro con el fin de recoger datos de temperatura y pH de la masa de residuo correspondiente al eje del recipiente. Para evitar proliferación de vectores y pérdidas de material, a cada uno de los orificios de la celda se le adaptó una tapa rosca. Mientras no se realizaba muestreo, todos los orificios permanecían cerrados.



Foto 1. Celda experimental abierta con orificios para muestreo

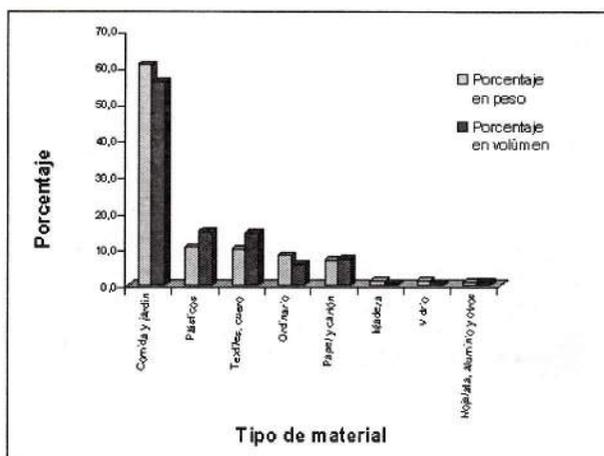
Las celdas se instalaron en la zona destinada por la Universidad de Antioquia para el almacenamiento temporal de sus residuos sólidos, y se ocupó un espacio de unos 15 m<sup>2</sup> para el montaje de las celdas, una abierta, expuesta a la precipitación, y la otra cerrada con una cubierta de polipropileno.

La conformación inicial de las celdas se realizó en mayo de 2004, hasta lograr de forma manual una compactación de 517 kg/m<sup>3</sup> para la celda abierta y 494 kg/m<sup>3</sup> en la cerrada, valores que están en el rango definido por Tchobanoglous<sup>3</sup> para residuos urbanos en vertederos medianamente compactados.

3 TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H. y VIGIL, S. Gestión integral de residuos sólidos. Madrid, McGraw-Hill, 1994.

Para evitar problemas de olores y de vectores y simular las condiciones de operación de un relleno sanitario, se cubrieron ambas celdas con una capa de unos 10 cm de material inerte.

Los residuos sólidos que se utilizaron para conformar las celdas provenían de un carro recolector de Empresas Varias de Medellín, EEVVM E.S.P., que hacía el recorrido en la zona tres de Medellín según la clasificación zonal de la empresa de recolección<sup>4</sup>. La caracterización se hizo por el método del cuarteo, homogeneizando la totalidad de los residuos y posteriormente utilizando la cuarta parte de éstos para su clasificación y determinación del peso. Los resultados obtenidos en la caracterización se muestran en la figura 1.



**Figura 1.** Composición de los residuos sólidos utilizados en el experimento, porcentaje en peso y volumen

Posterior a la conformación de las celdas se procedió a realizar un seguimiento diario, semanal o mensual, según el tipo de variable muestreada en la celda de experimentación. De acuerdo con el tipo de variable estudiada se tuvo el resultado directamente o debió llevarse la muestra al laboratorio. Las muestras que eran llevadas al laboratorio para la determinación de carbono orgánico disponible y humedad eran muestras compuestas. Para la determinación del pH

y los indicadores físicos, químicos y biológicos del lixiviado se consideraron muestras simples.

Para el análisis de la información se ordenaron los datos con el fin de realizar las comparaciones requeridas. Debido a que en el diseño experimental básicamente se buscó realizar comparaciones entre los puntos de muestreo establecido, se requirieron tablas de análisis de varianza (ANOVA) para la comparación simple de muestras y análisis de correlación para identificar el porcentaje de influencia de una variable respecto a otras.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Seguimiento de lixiviados

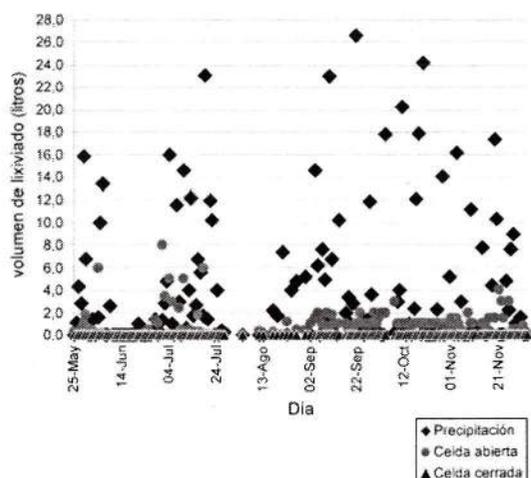
En cuanto a la generación de lixiviados, se pudo observar que la celda abierta los produjo continuamente, en cambio en la celda cerrada no se obtuvo un volumen de lixiviado suficiente para ser evacuado por el sistema de drenaje. En el diseño inicial de las celdas se consideró que el sistema de drenaje requería mínimo 12 litros de líquido antes de comenzar a drenar. Este hecho lleva a considerar como un aspecto crucial en la generación de lixiviado la influencia de la precipitación sobre el área de ubicación de los residuos sólidos. En la figura 2 pueden apreciarse el comportamiento en el tiempo de la generación de lixiviado en ambas celdas y la precipitación diaria sobre el área de la celda en litros, basados en la información pluviométrica registrada en la estación Miguel de Aguinaga de Empresas Públicas de Medellín E.S.P., en la ciudad de Medellín. Puede observarse un fenómeno de retención de la humedad en el material, tanto así que sólo días después de haber comenzado el período de lluvias se presentó generación de lixiviado.

Sin embargo, si se analiza con detenimiento la generación de lixiviados, se observan dos etapas,

<sup>4</sup> EEVVM E. S. P. Caracterización de los residuos sólidos en los sectores residencial y no residencial Zonas 1, 4, 7 y 9. Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería –CIA–, Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental –GIGA–, Universidad de Antioquia. Medellín, 2002.



la primera, con una generación de lixiviado a la par con la presencia de lluvias y un segundo período, posterior a una sequía, en el cual la generación de lixiviado es precedida de lluvias, pero no obligada a ellas, pues el material, por su alto contenido de materia orgánica, tiene mayor capacidad de campo, que hace que la generación de lixiviado se difiera en el tiempo.



**Figura 2.** Generación de lixiviados en el período mayo a diciembre de 2004

En cuanto a los indicadores relacionados con la calidad del lixiviado obtenido en la celda abierta, al compararlos con los valores que se consideran típicos en la literatura<sup>5</sup>, es claro que la fase en la que se encuentran estos residuos se asemeja más a una etapa acidogénica que metanogénica, lo que corresponde a la dinámica típica de este tipo de procesos anaeróbicos.

### Descomposición de los residuos sólidos en el tiempo

La humedad presente en la masa de residuos es un indicador fundamental a la hora de realizar seguimiento al proceso de descomposición. En la figura

3 se registran los valores encontrados para ambas celdas. La celda cerrada presenta los niveles más bajos de humedad, en promedio 34,8%, en comparación con un 54,8% de la abierta, aunque en algunas ocasiones alcanza valores tanto o más elevados que los obtenidos en la celda abierta. Esta situación resalta la elevada humedad con la que se entregan los residuos domiciliarios en Medellín, y debido a esto el nivel de complejidad a la hora de implementar obras de disposición final es mayor, reflejándose en los costos de operación y volumen de los productos de descomposición (gases y lixiviados).

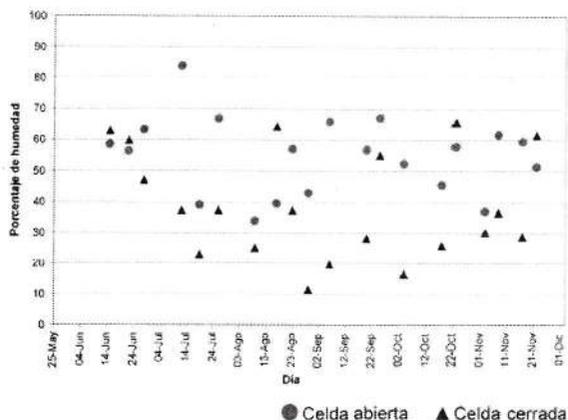
La humedad para la celda abierta y cerrada se encuentra en promedio entre 55% y 35%, valores que se acercan a lo precisado por Kiley<sup>6</sup> para residuos frescos domésticos, sin embargo, superan el rango establecido por el autor (15%-40%) para la celda abierta. La dispersión en los valores encontrados radica en la heterogeneidad del material, propia de la recolección no selectiva.

En la figura 4 hay cierta tendencia a disminuir los valores de los volátiles en los sólidos para ambas celdas, siendo ligeramente inferiores los presentados por la celda abierta. El agua es sin duda un factor fundamental a la hora de acelerar procesos de degradación; el material en esa celda pudo migrar vía lixiviado o vía vapor.

Los valores elevados (superiores al 70%) en el porcentaje de volátiles en los sólidos del residuo ratifican que el material es de "rápida" degradación, pero, en el tiempo de experimentación considerado, no se alcanza a evidenciar la transición desde la acidogénesis hasta la metanogénesis. Es importante resaltar que los elementos plásticos y el papel periódico, a pesar de poseer altas cantidades de sólidos volátiles, presentan una baja biodegradabilidad; en el caso del papel, por poseer elevados contenidos de lignina.

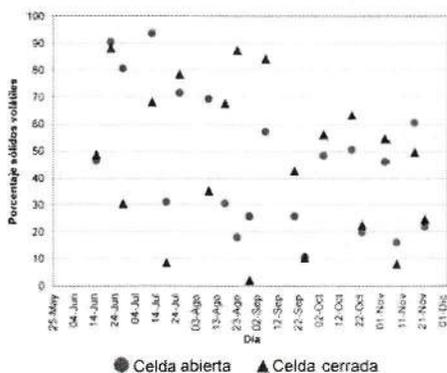
5 EHRIG, H. J. Water and element balances of landfills, in: Lecture Notes in Earth Sciences. The Landfill. New York, P. Baccini, 1989. p. 83-115.

6 KILEY, Gerard, Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Tomo III. Madrid, McGraw-Hill, 1999.



**Figura 3.** Humedad en ambas celdas de experimentación en el período mayo a diciembre de 2004.

La gran variación de los valores obtenidos, que se observa en la gráfica, obedece a la heterogeneidad de la muestra y está en el rango que según Kiley<sup>7</sup> presentan los diversos materiales que componen los residuos (16-99% de sólidos volátiles).



**Figura 4.** Sólidos volátiles en ambas celdas de experimentación en el período mayo a diciembre de 2004.

### Comparación del proceso de descomposición de los residuos sólidos en diferentes alturas para cada celda experimental y entre ellas

De acuerdo con la información que se presenta en la tabla 1, sólo existe diferencia significativa entre las mediciones de temperatura de la celda abierta y cerrada realizadas en el sitio 1 y en el sitio 3 cuando el muestreo se realizó entre las 10 y 14

horas. Cuando el muestreo fue realizado entre las 6 y 8 horas, no hay diferencia significativa de los resultados obtenidos entre la celda abierta y la celda cerrada en los tres sitios de muestreo.

Esta diferencia se debe a los procesos de calentamiento y transporte de calor y comienza con la radiación solar diaria; como es de esperarse, en la celda cerrada la transferencia de calor al ambiente es más lenta, por lo que se alcanzan mayores temperaturas. La transferencia de calor se da de manera vertical y horizontal por las paredes de la celda; se acentúa cuando la radiación solar es intensa, lo cual sucede entre las 10 y 14 horas.

**Tabla 1.** Indicadores para la comparación del comportamiento de la temperatura en ambas celdas de experimentación, por sitios y horas de muestreo.

Sitio de muestreo	Hora de muestreo	Indicadores	Intervalo de confianza (95%)	Estadístico de prueba	Probabilidad asociada
1	10-14	Diferencia de medias	-6,17;-3,12	T= -6,08	0,00
		Razón de varianzas	0,46;1,67	F=0,93	0,78
	6-8	Diferencia de medias	-0,63;2,97	T= 1,30	0,20
		Razón de varianzas	0,47;1,0	F=0,90	0,71
2	10-14	Diferencia de medias	-1,19;0,25	T= -1,28	0,20
		Razón de varianzas	0,52;1,17	F= 0,78	0,26
	6-8	Diferencia de medias	-0,93;1,19	T= 0,24	0,81
		Razón de varianzas	0,67;1,68	F= 1,06	0,79
3	10-14	Diferencia de medias	-0,07;-1,33	T= -2,20	0,05
		Razón de varianzas	0,44;0,10	F= 0,66	0,05
	6-8	Diferencia de medias	-1,07;0,75	T= -0,34	0,73
		Razón de varianzas	0,80;1,99	F= 1,26	0,32

Los valores sombreados presentan diferencia significativa con un 95% de confianza

7 Ibíd.



Al comparar el comportamiento de la temperatura entre los tres puntos de muestreo para cada celda mediante el análisis de varianza presentado en la tabla 2, se puede concluir que existe diferencia significativa entre los promedios de las temperaturas registradas cuando la medición se realizó entre las 6-8 horas y entre las 10-14 horas.

La existencia de una estratificación térmica es clara. Las mayores temperaturas se encuentran en los niveles superiores de la celda, donde la radiación solar incide directamente, y la parte inferior de la celda tiene los menores valores. Este resultado es consecuente con el observado en la tabla 1 y reafirma que la mayor diversidad de valores pertenece a la celda abierta cuando el muestreo se registró entre las 10 y 14 horas.

**Tabla 2.** Comparación de la temperatura promedio de las celdas experimentales por hora y sitio de muestreo.

Celda	Hora de muestreo	Sitio de muestreo	Temperatura promedio °C	Desviación estándar	Estadígrafo	Probabilidad
Abierta	10-14	1	24,44	3,39	12,91	0,00
		2	24,11	2,34		
		3	22,61	1,95		
		Test de Cochran	0,55			
	6-8	1	24,30	4,15	4,45	0,01
		2	24,38	3,37		
		3	22,85	2,10		
Test de Cochran		0,46				
Cerrada	10-14	1	29,08	3,51	46,53	0,00
		2	24,57	2,65		
		3	23,31	2,39		
		Test de Cochran	0,49			
	6-8	1	23,13	4,37	3,05	0,04
		2	24,25	3,26		
		3	23,01	2,67		
Test de Cochran		0,52				

Los valores sombreados presentan diferencia significativa con un 95% de confianza

Los resultados presentados en la tabla 3 permiten comparar el comportamiento de los promedios

de temperatura y la razón de varianzas entre cada uno de los sitios de muestreo para cada una de las dos celdas de experimentación cuando el muestreo se realizó entre las 6-8 horas y las 10-14 horas.

La diferencia de los resultados radica en la posibilidad de realizar acumulación de calor para la celda cerrada, lo que implica que, cuando el muestreo se realizó entre las 10-14 horas, la temperatura registrada es fruto de una acumulación de calor por el transcurso del día y no por una generación de calor debida a la descomposición de los residuos sólidos allí presentes.

**Tabla 3.** Comparación del comportamiento de la temperatura en ambas jornadas de muestreo para las celdas de experimentación

Celda	Sitio de muestreo	Indicador	Intervalo de confianza (95%)	Estadístico de prueba	Probabilidad asociada
Abierta	1	Diferencia de medias	-1,23;1,01	T=-0,76	0,81
		Razón de varianzas	0,10;2,33	F=1,50	0,06
	2	Diferencia de medias	-1,18;-0,62	T=0,60	0,05
		Razón de varianzas	1,34;3,21	F=2,07	0,00
	3	Diferencia de medias	-1,04;-0,54	T=0,62	0,05
		Razón de varianzas	1,54;3,66	F=2,36	0,00
Cerrada	1	Diferencia de medias	-0,81;-0,77	T=-0,55	0,00
		Razón de varianzas	0,70;3,33	F=1,53	0,28
	2	Diferencia de medias	-1,21;0,57	T=-0,71	0,47
		Razón de varianzas	0,98;2,43	F=1,51	0,06
	3	Diferencia de medias	-0,11;0,47	T=-0,76	0,45
		Razón de varianzas	0,81;1,23	F=1,24	0,32

Los valores sombreados presentan diferencia significativa con un 95% de confianza

Al analizar la diferencia de varianzas se puede apreciar que para la celda abierta los resultados indican diferencia significativa en el sitio de muestreo 3, mientras que para la celda cerrada no se presentó esta diferencia.

La radiación solar es el principal motivo por el cual existe diferencia en las temperaturas de ambas celdas de experimentación. A pesar de presentarse

estratificación, se debe más a factores físicos que a procesos internos biológicos durante el tiempo de observación de la variable (tabla 4). Este resultado verifica la importancia de la radiación solar para el incremento de la temperatura. La masa de residuos tiende a enfriarse en la noche y la temperatura varía a medida que inciden los primeros rayos solares.

**Tabla 4.** Correlación de la temperatura ambiente y la temperatura de los sitios de muestreo en las celdas de experimentación durante el período de observación de mayo a diciembre de 2004.

Celda	Hora de muestreo	Sitio de muestreo	Coefficiente de correlación	valor P
Abierta	10-14	1	0,79	0,00
		2	0,77	0,00
		3	0,68	0,00
	6-8	1	0,80	0,00
		2	0,77	0,00
		3	0,78	0,00
Cerrada	10-14	1	0,58	0,00
		2	0,67	0,00
		3	0,48	0,01
	6-8	1	0,91	0,00
		2	0,94	0,00
		3	0,90	0,00

Los valores sombreados presentan diferencia significativa con un 95% de confianza

Los resultados de la comparación del pH entre las dos celdas por sitio de muestreo se encuentran en la tabla 5. La diferencia entre el pH de ambas celdas para los sitios de muestreo 1, 2 y 3 es significativa, según la probabilidad asociada al estadígrafo T y es corroborada en los tres casos por los valores del intervalo de confianza para la diferencia de medias.

El pH tiende a ser mayor para la celda abierta en los tres sitios analizados. Es importante resaltar la importancia del agua como solvente universal y es por esta razón por la que para la celda abierta el pH tiende hacia la neutralidad. La presencia de lluvias

y de aguas de escorrentía modifica los procesos de estabilización y degradación de los residuos sólidos presentes en los rellenos sanitarios.

**Tabla 5.** Comparación del pH en los sitios de muestreo de ambas celdas de experimentación.

Sitio de muestreo	Indicadores	Intervalo de confianza	Estadístico de prueba t Student	Probabilidad asociada
1	Diferencia de medias	0,14;0,82	T=2,82	0,00
	Razón de varianzas	0,66;2,09	F=1,22	0,53
2	Diferencia de medias	0,00;0,72	T=2,01	0,04
	Razón de varianzas	0,64;1,62	F=1,00	0,98
3	Diferencia de medias	0,53;1,036	T=6,09	0,00
	Razón de varianzas	0,93;1,99	F=1,36	0,11

Los valores sombreados presentan diferencia significativa con un 95% de confianza

La tabla 6 presenta los resultados de la comparación del pH entre los tres sitios de muestreo para cada una de las celdas de experimentación. Con el análisis de varianza se concluye que para las dos celdas (abierta y cerrada) existe diferencia significativa del valor de pH obtenido entre los tres sitios de muestreo. Es decir, que existe estratificación por pH en ambas celdas de experimentación, sin embargo, la estratificación no sigue una variación consecutiva, sino que tiende a tener los valores más altos de pH en el sitio 1 de muestreo, luego en el sitio 2 se presentan los valores más bajos y, por último, en el sitio 3 se reportan valores intermedios de pH para ambas celdas.

Debido a la capacidad de amortiguamiento del material contenido, no se alcanza a evidenciar la presencia de la fase acidogénica; además se observa desde las variables analizadas que no existe una diferencia marcada entre el proceso de descomposición ocurrido en la celda abierta y en la celda cerrada.



**Tabla 6.** Comparación del pH para los tres sitios de muestreo en cada una de las celdas.

	Sitio de muestreo	Promedio	Desviación estándar	Estadígrafo F	Probabilidad
Celda cerrada	1	6,69	0,78	5,94	0,00
	2	6,07	1,09		
	3	6,05	0,87		
	Test de Cochran para independencia			0,47	0,00
Celda abierta	Sitio 1	7,17	0,86	10,22	0,00
	Sitio 2	6,44	1,09		
	Sitio 3	6,83	1,01		
	Test de Cochran para independencia			0,40	0,1428

Los valores sombreados presentan diferencia significativa con un 95% de confianza

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Puede afirmarse que la humedad es un factor decisivo para lograr la estabilización del residuo, sin embargo, la velocidad de la degradación no se ve acelerada por este agente, pues en ambas celdas, a pesar de encontrarse diferencias con respecto al pH y temperatura, no se puede decir con certeza que el proceso de degradación alcanzó completamente la etapa de acidogénesis.

Es contundente la influencia de la precipitación en la generación de lixiviados, pues la celda cerrada, que estaba aislada de la precipitación, no los generó durante el tiempo de la experimentación. Este comportamiento es de gran importancia, pues ratifica lo fundamental que resulta la utilización de sistemas de cobertura de los residuos dispuestos en la protección de las celdas de los rellenos sanitarios frente a aguas de escorrentía.

El lixiviado tiene baja biodegradabilidad, a pesar de provenir de una masa de residuos con

composición porcentual de sólidos volátiles superior al 40%, lo cual representa un potencial de contaminación alto en aguas corrientes y subterráneas. El valor es debido en parte a productos de la degradación biológica de la materia orgánica y además a la presencia de sustancias xenobióticas provenientes de los diferentes residuos que se recolectan cuando las comunidades no separan en la fuente sus residuos.

El fenómeno de transporte y acumulación de calor proveniente de la radiación solar es el factor preponderante en la temperatura interna de cada una de las celdas de experimentación, el cual fue favorecido por la humedad interna propia de los residuos.

La temperatura y el pH registrados en ambas celdas no alcanzan valores para considerarse inhibidores en los procesos biológicos de degradación.

Con respecto a la hipótesis de trabajo considerada, se puede afirmar que los fenómenos de degradación de la materia orgánica se relacionan con las condiciones ambientales, específicamente la precipitación, a la cual queda expuesta la celda. Pero ésta no es la única variable que condiciona el proceso, pues en ambas celdas, a pesar de existir diferencia significativa en algunos sitios con respecto a su pH y temperatura en la masa de residuos, el avance en el proceso de degradación no alcanzó a superar la fase aerobia para ser completamente anaerobia, en particular acidogénica. Tal vez por presentar inhibidores o condiciones que en cierta medida reducen la actividad microbiana, por ejemplo, presencia abundante de residuos separados por bolsas plásticas.

Para definir propuestas de gestión en los municipios colombianos, es necesario comenzar desde el origen de los residuos, pues uno de los problemas relacionados con los rellenos sanitarios es su vida útil y la producción per cápita, que está en aumento. Así que como primera medida es necesario considerar la minimización de los residuos sólidos; por esta razón se recomienda no ahorrar esfuerzos en promoverse

hábitos de este tipo en las comunidades. Igual sucede con la cultura de separación, que permita mayor valorización de residuos y específicamente en los rellenos sanitarios se propiciarían sustratos más homogéneos, con menores concentraciones de venenos e inhibidores del crecimiento microbiano, lo que conduce a una degradación de los residuos en menor tiempo.

Para conocer con más detalle los fenómenos relacionados con la degradación de la materia orgánica presente en los residuos sólidos se recomienda continuar con la investigación, aprovechando las celdas experimentales montadas y abarcar un lapso de varios años que permita comparar y conocer el comportamiento de las variables de estudio en las diferentes etapas de degradación de la materia orgánica.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARIAS, S. C. Monitoreo de una celda experimental de residuos sólidos urbanos. Tesis (Maestría en Ingeniería Ambiental), Universidad de Antioquia. Medellín, 2005.
- EEVVM E. S. P. Caracterización de los residuos sólidos en los sectores residencial y no residencial Zonas 1,4, 7 y 9. Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería -CIA-, Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental -GIGA-, Universidad de Antioquia. Medellín, 2002.
- EHRIG, H. J. Water and element balances of landfills. In: Lecture Notes in Earth Sciences. The Landfill. New York, P. Baccini Ed., 1989.
- KILEY, Gerard. Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión, Tomo III. Madrid, Mc Graw Hill, 1999.
- PINEDA M., Samuel Ignacio. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. LIME-Acodal, 1998.
- TCHOBANOGLOUS, G., THEISEN, H. y VIGIL, S. Gestión integral de residuos sólidos. Madrid, McGraw-Hill, 1994.
- RITA, Fábio (2002). Desempenho de um reator UASB em escala piloto para o tratamento anaeróbico de líquidos percolados de resíduos sólidos urbanos. En: <http://www2.enq.ufsc.br/teses/m090.pdf>