

Interciencia
Asociación Interciencia
interciencia@ivic.ve
ISSN (Versión impresa): 0378-1844
VENEZUELA

2008

José Ramón Laines Canepa / Jorge Alberto Goñi Arévalo / Randy Howard Adams
Schroeder / Wilder Camacho Chiu

MEZCLAS CON POTENCIAL COAGULANTE PARA TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS
DE UN RELLENO SANITARIO

Interciencia, January, año/vol. 33, número 001

Asociación Interciencia

Caracas, Venezuela

pp. 22-28


MEZCLAS CON POTENCIAL COAGULANTE PARA TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO

JOSÉ RAMÓN LAINES CANEPA, JORGE ALBERTO GOÑI ARÉVALO, RANDY HOWARD ADAMS SCHROEDER y WILDER CAMACHO CHIU

RESUMEN

En el manejo de residuos sólidos una alternativa es el relleno sanitario, la cual es un problema debido a que el lixiviado generado representa un riesgo de contaminación de agua y suelo. Se determinó el potencial de coagulación-floculación de mezclas con proporciones variables de almidón de plátano, sulfato de aluminio y arcillas (LASA 55; LASA 73; LASAB 23530 y LASAR 23530). Para evaluar la efectividad se corrieron testigos de coagulación con sulfato de aluminio y cloruro férrico. El lixiviado fue pretratado y se desarrollaron pruebas de jarras, midiendo turbiedad, color, demanda química de oxígeno (DQO), pH, sólidos suspendidos totales (SST) y conductividad. La turbiedad se redujo a $<5\text{ UNT}$ con $75\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en dos trata-

mientos (LASA 55 y sulfato de aluminio). La mayor remoción de color se obtuvo con cloruro férrico, seguidas por LASA 55 y sulfato de aluminio, LASAB 23530 y LASA 73, siendo LASAR 23530 la menor. Las mezclas basadas en almidón más sulfato de aluminio tuvieron un bajo nivel de remoción de DQO; a diferencia de LASAR, los coagulantes convencionales presentaron mejor remoción. En cuanto a los SST y conductividad, se obtuvo una correlación muy similar entre ambas. Los resultados permitieron establecer la factibilidad de aplicar mezclas con propiedades coagulantes para el tratamiento de lixiviados o para pruebas futuras en el tratamiento de aguas residuales industriales o municipales.

 El almacenamiento de residuos sólidos en vertederos controlados ha permitido un gran avance en la protección del medio ambiente; no obstante, ha generado un problema por la aparición de un vertido altamente contaminado, lixiviados de difícil tratamiento mediante tratamientos convencionales (Jiménez, 2004).

El alto poder contaminante de los lixiviados hace necesario un tratamiento adecuado, previo a su destino final. Este tratamiento dependerá del origen, composición y producción del lixi-

viado, mientras que la disposición final variará de acuerdo con los tratamientos recibidos, tales como vertido a aguas superficiales, descarga en estaciones depuradoras de aguas residuales, descarga sobre pilas de compostaje o descarga sobre el propio vertedero (CER, 2000).

La selección del proceso de tratamiento de lixiviados es una tarea compleja (Longsdon *et al.*, 2002). No existe, por tanto, un sistema de tratamiento exclusivo para el lixiviado; por el contrario, se proponen normalmente numerosos métodos de tratamiento que se combinan e incluyen tratamiento biológico,

co, precipitación química, adsorción con carbón activado, sedimentación, flotación y filtración como tratamientos generales, y tratamientos específicos tales como oxidación o reducción química, intercambio iónico, membranas, *stripping* y oxidación húmeda (Bueno *et al.*, 1995).

Según Tchobanoglous *et al.* (1998) la gestión de lixiviados es clave para la eliminación del potencial que tiene un vertedero para contaminar acuíferos subterráneos. Estos autores comentan el uso de varias alternativas para gestionar el lixiviado recolectado de los vertederos, incluyendo 1) reciclaje del lixiviado, 2)

PALABRAS CLAVE / Almidón / Mezclas Coagulantes / Prueba de Jarras / Residuo Sólido /

Recibido: 17/07/2007. Modificado: 19/10/2007. Aceptado: 01/11/2007.

José Ramón Laines Canepa. Ingeniero Industrial Químico, Maestro en Ingeniería y Protección Ambiental y Candidato a Doctor en Ciencias, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México. Profesor Investigador, UJAT, México. Dirección: Calle Sextante esquina Perseo, Manzana 23, Lote 24, CP. 86126 Centro, Tabasco, México. e-mail: Josra_2001@yahoo.com.mx

Jorge Alberto Goñi Arévalo. Licenciatura en Hidrobiología, Universidad Autónoma Metropolitana, México. M.S. en Ciencias Ambientales, American University Washington, EEUU. Ph.D. en Ingeniería Ambiental, University of Texas, Austin, Texas, EEUU. e-mail: jgoni@prodigy.net.mx

Randy Howard Adams Schroeder. Biólogo (Microbiología), Washington University, Seattle, EEUU. Ph.D. en Edafología, University of California, Riverside, EEUU. Profesor-Investigador, UJAT, México. e-mail: drrandocan@hotmail.com

Wilder Camacho Chiu. Ingeniero Agrónomo, Colegio Superior de Agricultura Tropical, México. Maestro en Ciencias en Suelos Tropicales y Doctor en Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. e-mail: Wilder-camachochiu@hotmail.com

evaporación del lixiviado, 3) tratamiento seguido por evacuación, y 4) descarga a los sistemas municipales para la recolección de aguas residuales.

Tradicionalmente, el sistema que más se ha utilizado es la recirculación del lixiviado al propio vertedero, que se convierte así en un gigantesco digestor anaerobio para el tratamiento de los lixiviados. La Norma Oficial Mexicana 083 (SEMARNAT, 2003) especificó en su apartado 7.3 que debe construirse un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado en el sitio de disposición final. El lixiviado debe ser recirculado en las celdas de residuos confinados en función de los requerimientos de humedad para la descomposición de los residuos, o bien ser tratados o una combinación de ambas. Este sistema aporta importantes ventajas entre las que se destacan la reducción del tiempo necesario para la estabilización del vertedero, la reducción del volumen de lixiviados por evaporación y la reducción de los costos finales de tratamiento (Pohland y Kim, 1999); los inconvenientes más importantes que presenta son el alto costo de mantenimiento de los sistemas de recirculación de lixiviados, la emisión de olores en las balsas de almacenamiento, producción de insectos y la necesidad de diseño de sistemas de recolección de lixiviados para cargas hidráulicas más altas.

Muchas han sido las contribuciones en el tratamiento de los lixiviados. González y Valdivia (2001) trataron lixiviados como un aporte adicional a las aguas residuales, en un sistema de lodos activados. El proceso Biodestil, como tratamiento de lixiviado en vertederos, representa una solución integral a los vertidos con altas cargas contaminantes en situaciones en que se quiere alcanzar elevados rendimientos de depuración (Jiménez, 2004). Matarán *et al.* (2003) utilizaron filtros inundados en el tratamiento de lixiviados procedentes de residuos sólidos urbanos. La empresa Air Liquide España, S.A., ha consumido oxígeno puro en dos plantas de depuración de lixiviados (Parra, 1999).

En las últimas décadas los sistemas de tratamiento de lixiviados se han perfeccionado considerablemente y se han vuelto más fiables. Muchos vertederos europeos incluyen ahora plantas bien diseñadas y construidas que permiten tratar los lixiviados de forma consistente con los niveles de limpieza específicos requeridos para cada emplazamiento (Robinson y Last, 1999).

Enzinger *et al.* (1987) revisaron las técnicas de tratamientos de lixiviados. En los últimos años se ha

investigado sobre tratamientos utilizando productos inorgánicos en procesos físicoquímicos. Ntampou *et al.* (2006) utilizaron una combinación de métodos físicoquímicos (coagulación-floculación y ozonificación) para hacer más eficiente el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Hamidi *et al.* (2007) removieron color de un lixiviado de relleno sanitario por medio de un proceso de coagulación-floculación. Rivas *et al.* (2004) estabilizaron lixiviados con un proceso secuencial de coagulación-floculación más oxidación química. Tatsi *et al.* (2003) utilizaron coagulación-floculación como pretratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Wang *et al.* (2002) utilizaron procesos de coagulación y foto-oxidación en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Amokrane *et al.* (1997) pretrataron lixiviados con coagulación-floculación.

De los rellenos sanitarios existentes en México, pocos cuentan con el tratamiento de sus lixiviados. Por consiguiente es necesario proponer procesos ambientalmente sustentables, que sean técnicamente realizables, económicamente viables y socialmente aceptables. Méndez *et al.* (2002) determinaron la tratabilidad físicoquímica de los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Mérida, mediante el uso de columnas empacadas con carbón activado, a través de las cuales se hizo pasar lixiviado crudo y lixiviado con pH ~2. Monje y Orta (2004) removieron y transformaron materia orgánica recalcitrante para estabilizar lixiviado salino de relleno sanitario.

En la actualidad, el uso de polímeros como ayudantes de coagulación y floculación está bastante extendido y es práctica corriente en muchas plantas de tratamiento de agua, principalmente de países industrializados.

En América Latina, en cambio, el uso se encuentra restringido debido a varios factores, entre los cuales se pueden mencionar el elevado costo de los polímeros (polielectrolitos) industriales; el hecho que en muchos de estos países la producción de polímeros aplicables al tratamiento es poca o inexistente y, en consecuencia las empresas de servicio se ven forzadas a depender de un producto importado, cuyo abastecimiento puede escasear en cualquier momento; y el bajo nivel de desarrollo tecnológico en algunos lugares, que no permite la rápida utilización de nuevos productos.

La solución a estos problemas es el desarrollo de nuevos productos de fácil aplicación y que puedan sustituir a los importados. Este es el caso de los polímeros naturales que se obtienen de una variedad de plantas nativas.

Generalmente, son utilizados con diferentes propósitos, pero podrían servir en muchos casos como excelentes ayudantes de coagulación o floculación. Tal es el caso del alginato de sodio, goma de tuna, almidones solubles en agua fría (pregelatinizados), goma de semillas de nirmali, pulpa de algarrobo, gelatina común, carboximetil celulosa, goma de guar, goma de red sorrela, sílica activada, lentejas, tamarindo, alhova, floccotan (Kirchmer *et al.*, 1975), *Moringa oleifera* (Janh y Dirar, 1979) y quitosana (Janh, 1981). En este estudio se explora la utilización de almidón de plátano.

Coagulantes y floculantes típicos incluyen (Metcalf & Eddy, 2003) polímeros orgánicos naturales y sintéticos, sales de metales como el alumbre o el sulfato férrico, y metal prehidrolizados como el cloruro de polialuminio (PACI) y cloruro de polifierro (PICI).

Los polielectrolitos se dividen en naturales y sintéticos. Los polielectrolitos naturales importantes incluyen polímeros de origen biológico, los derivados del almidón, de la celulosa y alginatos. Según el signo de la carga en el momento de introducirlos en agua (negativo, positivo o neutro) se les clasifica en polielectrolitos aniónicos, catiónicos, y no iónicos respectivamente.

La acción de los polielectrolitos puede ser dividida en tres categorías generales. En la primera, los polielectrolitos actúan como coagulantes disminuyendo la carga de las partículas. Puesto que las partículas del agua residual están cargadas negativamente, se emplean polielectrolitos catiónicos, los que son considerados coagulantes primarios en esta aplicación. La segunda forma de acción de los polielectrolitos es la formación de puentes de unión entre las partículas; en este caso los polímeros aniónicos y no iónicos (por lo general, ligeramente aniónicos al ser introducidos en agua), se adhieren a un número de puntos de adsorción de la superficie de las partículas presentes en el efluente sedimentado. El tercer tipo de acción de los polielectrolitos puede clasificarse como una acción de coagulación-formación de puentes, que resulta al emplear polielectrolitos catiónicos de alto peso molecular (Metcalf & Eddy, 2000).

El almidón es una fracción importante de un gran número de productos agrícolas, tales como cereales (maíz, trigo, arroz) cuyo contenido de este carbohidrato es de 30-80%; leguminosas (fríjol, chícharo, haba) con 25-50%; tubérculos (papa, yuca) en los que el almidón representa 60-90%; y algunas frutas como el plátano y el mango, que

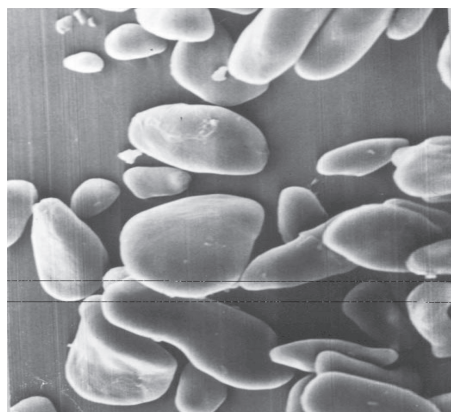


Figura 1. Gránulos de almidón de plátano nativo por microscopía electrónica de barrido.

en su estado verde o inmaduro alcanzan contenidos de almidón de hasta 70% en base seca. (Flores *et al.*, 2004).

La composición química proximal del almidón de plátano es (%): almidón 98,0 \pm 2,00; proteínas 0,22 \pm 0,01; cenizas 0,47 \pm 0,02; y grasa 0,26 \pm 0,01. El almidón de plátano nativo presenta una naturaleza no iónica y sus gránulos (Figura 1) son de formas irregulares, esferoides y alargadas, con diámetro de 12,8-40 μ m y longitud de 16,6-51,7 μ m.

El almidón utilizado es una materia prima de amplia disponibilidad, debido a que en la actualidad se dejan de exportar 30-50% de plátanos producidos en México (Flores *et al.*, 2004). En 2006 SAGARPA estimó en el estado de Tabasco una producción de plátanos de 665902ton, por lo que fueron desechadas 199771 a 332951ton. Si el 70% de este fruto es almidón, se tendría una producción de 139840 a 233066ton. La producción de plátano en el país está en el orden de 1962695ton.

El desarrollo de coagulantes de bajo costo aplicables en el tratamiento de lixiviados de aguas residuales municipales e industriales, lo cual podría significar incrementos en la eficiencia de este tipo de tratamientos en América Latina y otras regiones en vía de desarrollo. El presente trabajo persigue demostrar que con el uso de almidón de plátano en combinación con coagulantes inorgánicos existe una alternativa para la reducción del alto consumo de coagulantes orgánicos y un posible sustituto de los polímeros sintéticos cuyos costos son caros.

Se estableció el potencial de coagulación-floculación de cuatro mezclas formadas con proporciones variables de almidón de plátano, sulfato de aluminio y arcillas. Para evaluar su efectividad de coagulación-floculación se

emplearon muestras de lixiviado de un relleno sanitario regional con duración de operación intermedia (5-6 años), y se efectuaron testigos de coagulación mediante la aplicación de sulfato de aluminio y cloruro férrico aplicados de manera convencional. La viabilidad de las mezclas estudiadas representaría un ahorro significativo en los procesos convencionales de coagulación floculación en plantas de tratamiento de lixiviados o aguas residuales.

Materiales y Métodos

Lixiviado

El lixiviado utilizado proviene del Relleno Sanitario de la Región de la Sierra, con más de 5 años en operación, ubicado en el ejido Arcadio Zentella del municipio de Teapa, Tabasco, México (17°32'16,00"N y 92°52'34,9"O). Se tomaron seis muestras simples en el cárcamo de recepción de lixiviado con intervalo de 3h entre toma, conformando la muestra compuesta objeto de análisis (SEMARNAT, 1996).

Residuo agrícola

Se recolectó plátano (*Musa* AAA subgrupo Cavendish), considerado como desecho después del proceso de envasado, en la empacadora Bronco Banano, ubicada en el municipio de Teapa, Tabasco, México.

Aislamiento del almidón del plátano

Para ello se utilizó la metodología modificada de Aparicio (2003). Se pesaron y lavaron 5kg de plátano, los que fueron pelados y picados en porciones \sim 2x1,5cm, remojándose por 5min a 40°C en un recipiente que contenía un volumen de agua de seis veces el peso de la muestra, que luego fue molido en una licuadora a prueba de impacto, hasta su completa desintegración. Ya molido, la muestra se lavó tres veces con la misma agua utilizada para el remojo sobre un tamiz del N° 100, eliminándose la fibra retenida. El filtrado se fue acumulando en un recipiente donde se dejó

sedimentar por \sim 3h. El sobrenadante se separó por decantación y el sedimento se mantuvo refrigerado durante la noche. Al día siguiente se repitió la operación, eliminando nuevamente el sobrenadante. El sedimento obtenido se centrifugó a 850rpm durante 15min para separar el agua de la pasta. La pasta se secó en una estufa a 40°C por 24h, se pulverizó en porciones de 5g y se envasó en frascos de plástico de polietileno tereftalato (PET).

Preparación de las mezclas coagulantes

Se utilizaron dos coagulantes inorgánicos convencionales, sulfato de aluminio (SA) y cloruro férrico (CF) y se prepararon cuatro mezclas coagulantes basadas en almidón de plátano: LASA 55; LASA 73; LASAB 23530 y LASAR 23530, cuya composición se muestra en la Tabla I. Las arcillas bentónicas, la galactita y otras arcillas adsorbentes se utilizan para ayudar en la coagulación de aguas que contengan color intenso o baja turbiedad, como es el caso del lixiviado en estudio, y proporcionan materia suspendida adicional al agua en la que se pueden formar los flóculos. Estas partículas floculantes son luego capaces de sedimentarse rápidamente debido al alto peso específico de la arcilla (Schulz y Okun, 1998).

Análisis de las características físicoquímicas del lixiviado

Antes del experimento, una muestra de lixiviado fue remitida para su análisis en un laboratorio certificado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). Después de realizado el experimento se midió el color por el método estándar 2120B y la turbiedad por el método EPA 180.1 (EPA, 1983, 1993; ISO, 1990). Para determinar la demanda química de oxígeno (DQO) se utilizó un sistema de medición de Hanna Instruments, calificado por el Centro Nacional de Metrología (CENAM) y compuesto por fotómetro HI83099, reactor HI839800 y reactivos HI93754A-25 y HI93754B-25. El pH, los sólidos suspendidos totales (SST)

TABLA I
MEZCLAS COAGULANTES UTILIZADAS

Denominación	Almidón de plátano (%)*	Aluminio (%)*	Arcilla (%)*
LASA 55	50	50	-
LASA 73	70	30	-
LASAB 23530	35	35	30
LASAR 23530	35	35	30

* Porcentaje de masa seca.

TABLA II
ANÁLISIS QUÍMICO DEL LIXIVIADO

Parámetro	Unidades	Resultado	LD
Cianuros	mg·l ⁻¹	<LD	0,0018
Coliformes fecales	NMP/100ml	>2400	3
DBO ₅	mg·l ⁻¹	142	2
DQO	mg·l ⁻¹	439	N/A
Fósforo	mg·l ⁻¹	0,82	0,0149
Grasas y aceites	mg·l ⁻¹	4,45	N/A
Helmintos	Huevos de helmintos/L	<1	1
Material flotante	mg·l ⁻¹	Ausente	N/A
Nitrógeno total	mg·l ⁻¹	185,92	0,05
Nitrógeno de nitritos	mg·l ⁻¹	<LD	0,0015
pH	pH	6,8	N/A
Sólidos sedimentables	mg·l ⁻¹	1,5	0,1
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg·l ⁻¹	205	N/A
Conductividad	uS/cm	4200	N/A
Color	u.c	1043	N/A
Turbiedad	UNT	126	N/A
Temperatura	°C	28	N/A

N/A: no aplicable, LD: límite de detección, <LD: menor al límite de detección.

y la conductividad fueron medidas con un aparato de medición Hanna Instruments.

Realización del experimento

Se hizo un pretratamiento al lixiviado, tomando como ejemplo el tren de pretratamiento del relleno sanitario de bordo poniente ubicado en el Distrito Federal, México, consistente de

–*Acidificación.* Se añadió ácido sulfúrico concentrado con el fin de oxidar la materia orgánica disuelta en el lixiviado y adecuarlo de esta forma para la etapa de coagulación. El pH de control fue de 4,5.

–*Neutralización.* Se agregó cal (CaOH)₂, para ajustar el pH hasta un valor ~7.

–*Coagulación-floculación.* Una vez pretratado el lixiviado se realizó la prueba de jarras, cada una con cuatro repeticiones. Para ello se agregó 1000ml del lixiviado pretratado en seis vasos de precipitado y se adicionaron tanto las mezclas coagulantes como los coagulantes convencionales a seis concentraciones diferentes (75, 150, 225, 300, 375mg·l⁻¹) más un testigo. El mezclado se realizó según el método de Letterman y Villegas (1976), con mezcla rápida por 15seg a 200rpm, a fin de desestabilizar las cargas superficiales de las partículas de la materia orgánica contenida, seguida de mezcla lenta por 25min a 25rpm para promover la formación de flóculos. Se dejó sedimentar cada vaso por 30min y al término de la sedimentación se midió turbiedad, color, DQO, pH, SST y conductividad.

Análisis estadístico

Se utilizó el diseño completamente al azar para el análisis de varianza y probar la igualdad de medias

entre los tratamientos; y en caso de existir diferencias entre tratamientos se realizó una prueba de medias por el método de Tukey (Olivares, 1994).

Resultados y Discusión

Análisis de lixiviados

La muestra de lixiviado se tomó en el mes de septiembre de 2006 (precipitación mensual de 534mm), en una región con precipitación anual de 3424mm. La temperatura ambiente al momento de la toma de muestra fue de 26°C. En la Tabla II, se muestran los análisis de la composición del lixiviado realizada por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). De acuerdo a los mismos, se tiene que plantear la posibilidad de una fuerte dilución ocasionada por las lluvias intensas durante el periodo de muestreo, ya que algunos parámetros conservativos como SST y fósforo, muestran valores menores a los reportados (Tchobanoglous *et al.*, 1998).

Pruebas de efectividad de mezclas coagulantes

Las pruebas de jarras realizadas a fin de evaluar la funcionalidad de las mezclas coagulantes utiliza-

das permiten comparar la efectividad de coagulación de las mezclas con base en almidón de plátano, sobre los lixiviados recolectados en el relleno sanitario. Tal efectividad se evaluó bajo criterios comparativos en relación a los resultados obtenidos por la coagulación obtenida por el sulfato de aluminio o el cloruro férrico.

Para medir los resultados de la prueba de coagulación-floculación se utilizaron parámetros que convencionalmente se utilizan en pruebas de coagulación para agua potable, dado que son económicas, rápidas de efectuar, y porque el pretratamiento aplicado permite obtener un comportamiento similar a este tipo de coagulación.

Remoción de turbiedad

En relación a la remoción de turbiedad, en dos casos se redujo la turbiedad a <5UNT con 75mg·l⁻¹, con el uso del coagulante convencional de sulfato de aluminio y con la mezcla coagulante LASA55 (Tabla III, Figura 2a). El análisis de varianza para los datos de turbiedad a concentración de 75mg·l⁻¹ indica diferencias significativas (P≤0,01) entre tratamientos. La prueba de Tukey, confirma que los tratamientos de sulfato de aluminio y LASA55 se comportan de manera similar y diferente a los demás tratamientos (Tabla IV).

Las mediciones de turbiedad obtenidas con el sulfato de aluminio (1,83UNT) y el producto LASA 55 (3,32UNT) a una concentración de 75mg·l⁻¹, se encuentran cerca del límite del agua filtrada (1UNT) según EPA (1993). El proceso de remoción de partículas de 94% y 90% para sulfato de aluminio y LASA 55, respectivamente, son comparables con el 97% de reducción de turbiedad obtenidos por Amokrane *et al.* (1997) utilizando como coagulantes al cloruro férrico y sulfato de aluminio, así como floculantes aniónicos, catiónicos y polímeros no aniónicos.

Remoción de color

La mejor remoción de color (Figura 2b) con una dosis de

TABLA III
TURBIEDAD MEDIA DE LOS PRODUCTOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Producto	Dosis de coagulante (mg·l ⁻¹)	Turbiedad residual (UNT)	
		\bar{X}	δ
Sulfato de aluminio	75	1,83	0,74
Cloruro férrico	75	13,53	0,73
LASA55	75	3,32	2,42
LASA73	75	17,73	4,41
LASAB 23530	75	16,41	3,63
LASAR 23530	75	9,17	3,00

75mg·l⁻¹ fue la obtenida con el cloruro férrico (60%); sin embargo, las siguientes mejores remociones fueron las obtenidas por LASA 55 (42%) y por sulfato de aluminio (44%), seguidas de cerca por las mezclas coagulantes LASAB 23530 (39%) y LASA 73 (37%). La peor remoción de color fue la obtenida con el uso de LASAR 23530 (26%), dado su contenido de arcilla, que pudo haber propiciado un color adicional.

El análisis de varianza para los datos de color (Tabla V) a concentración de 75mg·l⁻¹ indican diferencias significativas ($P \leq 0,01$). Los análisis en relación a la comparación de medias de Tukey confirman que hay dos grupos que se comportan de manera similar: 1) LASA55, LASA 73 y LASAB 23530; y 2) sulfato de aluminio, LASA 55 y LASAB 23530; mientras que dos productos no son comparables, la mezcla LASAR 23530 y el cloruro férrico.

Reducción de DQO y pH residual

En los análisis para evaluar la reducción de DQO se obtuvieron resultados variados (Figura 2c), dado que de manera inversa al caso de la remoción de color y turbiedad, las mezclas basadas en almidón más sulfato de aluminio tuvieron un papel pobre en remover DQO. Por su parte, la mezcla LASAR (con arcilla activada) mostró una mejor capacidad de remoción.

Los coagulantes puros (sulfato de aluminio y cloruro férrico), presentaron mayores niveles de remoción de DQO que cualquiera de las mezclas coagulantes. Esto puede explicarse ya que, si bien las mezclas remueven DQO, solo lo hacen con la fracción particulada, lo cual explica de manera correlativa

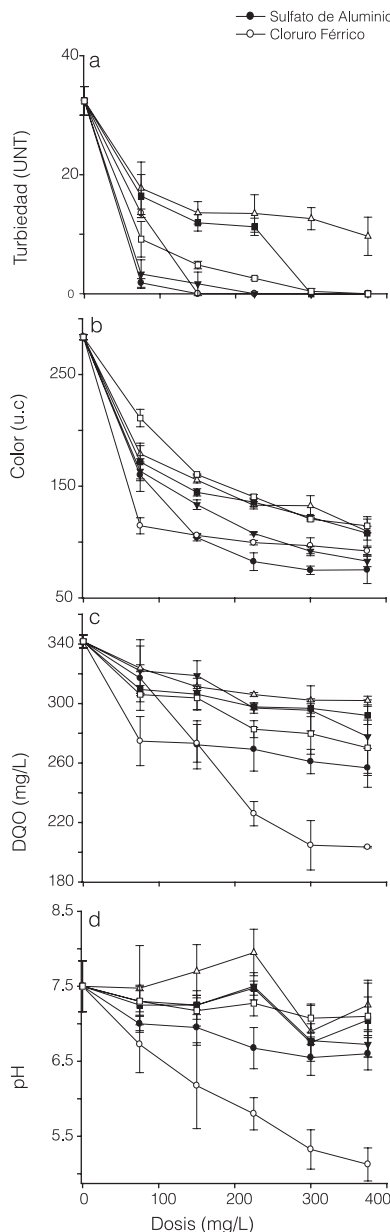


Figura 2. Reducción en turbiedad (a), color (b), DQO (c) y pH residual (d), empleando coagulantes convencionales y mezclas coagulantes.

Figura 2d). Comparando las gráficas de las Figuras 2 c y d, se puede establecer una clara correlación entre el pH resul-

TABLA IV
RESULTADO DE LA COMPARACIÓN DE MEDIAS DE TURBIEDAD

Tratamiento	Media	Comportamiento
LASA 73	17,37	a
LASAB 23530	16,41	a
Cloruro férrico	13,53	a b
LASAR 23530	9,17	b
LASA 55	1,83	c
Sulfato de aluminio	3,32	c

Letras iguales: comportamientos similares; nivel de significancia= 0,05

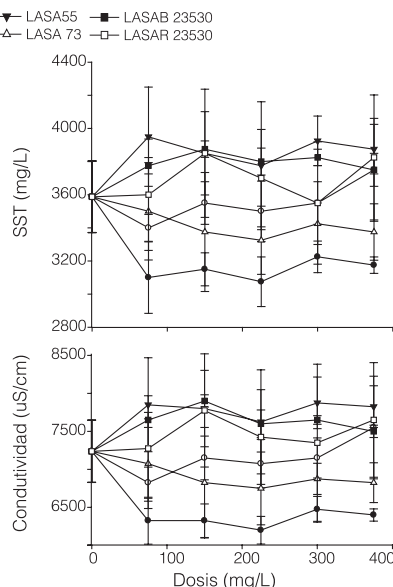


Figura 3. Variación de SST (a) y valores de conductividad (b), empleando coagulantes convencionales y mezclas coagulantes

la remoción de turbidez y color. También, la mezcla con arcilla activada puede efectuar procesos de adsorción que significan una capacidad adicional de reducción de DQO o partículas coloidales.

La DQO excedente removida tanto por el cloruro férrico, así como por el sulfato de aluminio, se explica como un factor de oxidación química de la materia orgánica disuelta, dados los menores pH que se causan por la adición de estos compuestos (Figura 2d). Comparando las gráficas de las Figuras 2 c y d, se puede establecer una clara correlación entre el pH resul-

tante de cada compuesto y el porcentaje de reducción de DQO obtenido.

Ntampou *et al.* (2006) lograron reducir un 72% de DQO a una concentración de 180mg·l⁻¹ utilizando 7mM de hierro más 11mM de aluminio en el proceso de coagulación-floculación y posteriormente aplicando ozonificación. Tatsi *et al.* (2003) lograron reducciones hasta de un 80% con cloruro férrico, pero estabilizando previamente el lixiviado con cal. Wang *et al.* (2002) redujeron en 24% la DQO utilizando 1000mg·l⁻¹ de cloruro férrico, aumentando la remoción a 31% tras irradiar la muestra por 4h (foto-oxidación); con-

trolando el pH a 3 con 500mg·l⁻¹ de cloruro férrico y el mismo tiempo de irradiación lograron una reducción de hasta un 64%. Monje y Orta (2004) lograron una reducción de la DQO en un 67% utilizando sulfato férrico como coagulante y el 33% de remanente fue removido con ozono. LASAR 23530 tuvo remociones de 11% a dosis de 150mg·l⁻¹, con una mezcla compuesta de 65% material orgánico y 35% sulfato de aluminio.

Variación en SST y conductividad

Las Figuras 3 a y b muestran el comportamiento de SST y conductividad, respectivamente. Se puede apreciar un comportamiento muy similar de ambas variables, lo cual puede indicar que el mayor componente de los SST se encuentra en fase disuelta, como producto tanto de la eliminación de partículas como de las cantidades adicionales de sales generadas por el pretratamiento.

TABLA V
RESULTADO DE LA COMPARACIÓN DE MEDIAS DE COLOR

Tratamiento	Media	Comportamiento
LASAR 23530	211,00	a
LASA 73	179,00	b
LASAB 23530	171,75	b c
LASA 55	163,50	b c
Sulfato de aluminio	160,00	c
Cloruro férrico	114,60	d

Letras iguales: comportamientos similares; nivel de significancia= 0,05

De hecho, comparando los valores iniciales de la muestra de lixiviado sin tratamiento ($4200\text{uS}\cdot\text{cm}^{-1}$), contra los valores promedio de la gráfica, se puede observar un incremento neto de 2000 a $3000\text{uS}\cdot\text{cm}^{-1}$ para todos los tratamientos. Esto podría ser un resultado secundario causado por el pretratamiento químico de la muestra antes de la coagulación, dada la adición de ácido y sosa caústica en el proceso de acidificación y neutralización.

Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados permitieron establecer la factibilidad de aplicar mezclas preparadas a base de almidón de plátano-sulfato de aluminio y arcillas con propiedades coagulantes para el tratamiento de lixiviados y en el ulterior tratamiento de aguas residuales industriales o municipales. Tales mezclas, por su menor costo, pudieran ser una opción de tratamiento físico en regiones en vías de desarrollo.

Con base en las pruebas efectuadas se pueden establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1-Las mezclas con mayor proporción de almidón sin arcilla fueron más efectivas para la remoción de color y turbiedad para los lixiviados tratados en este estudio. Las mezclas coagulantes que generan esta condición serían útiles de estudiar para su aplicación como un pretratamiento, previo a procesos de foto-oxidación en lixiviados, dada la buena remoción de turbiedad y color demostrados.

2-Las mezclas que contenían arcilla activada fueron ligeramente más eficientes para la reducción de la DQO, probablemente por la remoción adicional de fracciones susceptibles de ser adsorbidas. Este tipo de mezcla podría ser optimizada mediante la adición de compuestos con arcilla, pero en rangos de pH que favorezcan una mejor coagulación.

3-El pretratamiento aplicado a la muestra de lixiviados, si bien permitió remover una fracción importante del color inicial y de la turbiedad, significó un aporte adicional de sales disueltas, lo cual se reflejó tanto en la concentración de SST como en la conductividad. En el futuro se podrían efectuar las pruebas sustituyendo este pretratamiento por procesos de oxidación basados en el uso de ozono o UV.

4-Esta línea de investigación representa una oportunidad de evaluar el uso

potencial de coagulantes orgánicos o mezclas de bajo costo, como alternativa al uso tradicional de coagulantes inorgánicos como el sulfato de aluminio y cloruro férrico, que representan una fuerte erogación para los sistemas de tratamiento de lixiviados y aguas residuales en regiones en vías de desarrollo.

REFERENCIAS

- Amokrane A, Comel C, Veron J (1997) Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water Res.* 31: 2775-2782.
- Aparicio TM (2003) *Caracterización fisicoquímica de los almidones nativos y modificados de yuca (Manihot esculenta Crantz), camote (Ipomoea batata (L) Lam) y plátano valery (Musa cavendish)*. Tesis. Universidad Veracruzana. México. pp. 118-119.
- APHA (1998) *Método Estándar 2120. Color aparente. Comparación visual*. 20th ed. APHA-AWWA-WEF. Madrid, España. 10 pp.
- Bueno JL, Sastre H, Lavin AG, Fernández S, Cuervo M (1995) *Contaminación e ingeniería ambiental. Tomo IV. Degradación del suelo y tratamiento de residuos*. FICYT. Madrid, España. 422 pp.
- CER (2000). *Leachate Treatment: Principles and options. Curso superior sobre gestión y diseño de vertederos*. Club Español de Residuos. Madrid, España. 4 pp.
- EPA (1983) Método EPA 180.1: Turbidity (Nephelometric) En *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*. Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH, EEUU. 11 pp.
- EPA (1993) Method 180.1. Determination of Turbidity by Nephelometry. Rev. 2.0. En *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*. US Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH, EEUU. 10 pp.
- Enzminger JD, Robertson D, Ahlert RC, Kosson DS (1987) Treatment of landfill leachates. *J. Haz. Mat.* 14: 83-101.
- Flores E, García F, Flores E, Núñez M, González R, Bello-Pérez L (2004) Rendimiento del proceso de extracción de almidón a partir de frutos de plátano (*Musa paradisiaca*). Estudio en planta piloto. *Acta Cient. Venez.* 55: 86-90.
- González S, Valdivia C (2001) Tratamiento de los lixiviados de un vertedero en un sistema de lodos activados. *XXVII Cong. Interam. Eng. Sanit. Amb.* pp. 1-11.
- Hamidi A, Salina A, Mohd N, Faridah, Asaari A, Mohd S (2007) Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. *Bioresour. Technol.* 98: 218-220.
- ISO (1990) *Norma 7027*. 2nd ed. International Standards Organization. Ginebra, Suiza. 20 pp.
- Jahn SAA, Dirar H (1979) Studies on natural water coagulants in the Sudán, with special reference to *Moringa oleifera* seeds. *Water SA* 5(2): 90-97.
- Janh SAA (1981) *Tradicional water purification in tropical developing countries*. Existing methods and potential application GTZ. Eschborn, Alemania. Publ. N° 117.
- Jiménez RJ (2004) Tratamiento de lixiviados en vertederos. *Revista Residuos*. VOL???. pp. XX-XX.
- Kirchmer JC, Arboleda J, Castro M (1975) *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. CEPIS. Lima, Perú. 6 pp.
- Letterman R, Villegas R (1976) Optimizing Flocculator Power Input. American Society of Civil Engineers. *J. Env. Eng. Div.* 102: EE2:251.
- Longsdon G, Hess A, Horsley M (2002) *Guía para la selección de procesos de tratamientos de agua*. 1^a ed. McGraw Hill. Madrid, España. 131 pp.
- Matarán A, Ramos A, Moreno B, Zamorano M (2003) Utilización de filtros inundados en el tratamiento de lixiviados procedentes de vertederos de residuos sólidos urbanos. *Revista Residuos*. 13: 92-99.
- Méndez RI, Medina E, Quintal C, Castillo ER, Sauri MR (2002) Tratamiento de lixiviados con carbón activado. *Ingeniería* 6: 19-27.
- Metcalf & Eddy (2000) *Ingeniería de Aguas Residuales*. Rev. Tchobanoglous G, Burton FL. McGraw Hill. México. 356 pp.
- Metcalf & Eddy (2003) *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Rev. Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD. McGraw Hill. Boston, EEUU. 479 pp.
- Monje I, Orta M (2004) Removal and transformation of recalcitrant organic matter from stabilized saline landfill leachates by coagulation-ozonation coupling processes. *Water Res.* 38: 2359-2367.
- Ntampou X, Zouboulis AI, Samaras P (2006) Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates. *Chemosphere* 62: 722-730.
- Olivares SE (1994) *Paquete de diseños experimentales*. Ver. 2.5. Universidad Autónoma de Nuevo Laredo. México. 291 pp.
- Parra P (1999) Depuración de lixiviados con oxígeno en vertederos de RSU. *Revista Residuos* 48: 38-40.
- Pohland FG, Kim JC (1999) In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors. *Water Sci. Technol.* 40: 203-210.
- Rivas J, Beltrán F, Carvalho F, Acedo B, Gimeno O (2004) Stabilized leachates: sequential coagulation-flocculation + chemical oxidation process. *J. Haz. Mat.* 116: 95-102.
- Robinson H, Last S (1999) Tecnología punta en el tratamiento de lixiviados en Europa. *Revista Residuos* 46: 70-73.
- Schulz CR, Okun DA (1998) *Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo*. Limusa. México. 89 pp.
- SEMARNAT (1996) *Norma Oficial Mexicana 001. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas re-*

- siduales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. México. 35 pp.
- SEMARNAT (2003) *Norma Oficial Mexicana 083. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos urbanos y de manejo especial*. Diario Oficial de la Federación. México. 8 pp.
- Tatsi AA, Zouboulis AI, Matis KA, Samara P (2003) *Coagulation-floculation pretreatment of sanitary landfill leachates*. *Chemosphere* 53: 737-744.
- Tchobanoglous G, Theisen HA, Vigil S (1998) *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Vol. I. McGraw Hill. Madrid, España. pp. 469, 495.
- Wang Z, Zhang Z, Lin Y, Deng N, Tao T, Zhuo K (2002) Landfill leachate treatment by a coagulation-photooxidation process. *J. Haz. Mat.* 95: 153-159.

MIXTURES WITH CLOTTING POTENTIAL FOR THE TREATMENT OF LEACHATES OF A SANITARY LANDFILL

José Ramón Laines Canepa, Jorge Alberto Goñi Arévalo, Randy Howard Adams Schroeder and Wilder Camacho Chiu

SUMMARY

In the handling of solid wastes an alternative is the sanitary landfill site, which is a problem since the generated leachate represents a water and soil pollution risk. The coagulation-floculation potential of mixtures with variable proportions of banana starch, aluminum Sulfate and clays (LASA 55; LASA 73; LASAB 23530 and LASAR 23530) was determined. In order to evaluate the clotting effectiveness controls were run with aluminum sulfate and ferric chloride. The leachate was pre-treated and jar tests were performed, measuring turbidity, color, chemical demand of oxygen (DQO), pH, total suspended solids (SST) and conductivity. Turbidity decreased to <5UNT with 75mg·l⁻¹

in two treatments (LASA 55 and aluminum sulfate). The largest color removal was obtained with ferric chloride, followed by LASA 55 and aluminum sulfate, LASAB 23530 and LASA 73, the lowest being that with LASAR 23530. The mixtures based on starch plus aluminum sulfate showed a low DQO removal and, in comparison with LASAR, the conventional coagulants presented a better removal. A very similar correlation was observed with SST and conductivity. The results allowed to establish the feasibility of applying mixtures with clotting properties for leachates treatment and for future tests in the treatment of industrial or municipal residual waters.

MISTURAS COM POTENCIAL COAGULANTE PARA TRATAMENTO DE LIXIVIADOS DE UM ATERRO SANITÁRIO

José Ramón Laines Canepa, Jorge Alberto Goñi Arévalo, Randy Howard Adams Schroeder e Wilder Camacho Chiu

RESUMO

Na manipulação de resíduos sólidos uma alternativa é o aterro sanitário, um problema já que o lixiviado gerado representa risco de contaminação da água e solo. Determinou-se o potencial de coagulação-floculação de misturas com proporções variáveis de amido de plátano (espécie de banana), sulfato de alumínio e argilas (LASA 55; LASA 73; LASAB 23530 e LASAR 23530). Para avaliar a efetividade se realizaram provas de coagulação com sulfato de alumínio e cloreto férrico. O lixiviado foi pré-tratado e foram desenvolvidos ensaios de jarras, medindo turbidez, cor, demanda química de oxigênio (DQO), pH, sólidos suspensos totais (SST) e condutividade. A turbidez foi reduzida a <5UNT com 75mg·l⁻¹ em dois tratamentos (LASA 55 e sulfato de

alumínio). A melhor remoção de cor se obteve com cloreto férrico, seguidas por LASA 55 e sulfato de alumínio, LASAB 23530 e LASA 73, sendo LASAR 23530 a pior. As misturas baseadas em amido mais sulfato de alumínio tiveram um papel pobre de remoção de DQO; a diferença do LASAR, os coagulantes convencionais apresentaram melhor remoção. Quanto aos SST e condutividade, se obteve uma correlação muito similar entre ambas. Os resultados obtidos permitiram estabelecer a factibilidade de aplicar misturas com propriedades coagulantes para o tratamento de lixiviados ou para provas futuras no tratamento de águas residuais industriais ou municipais.