



VII Simposio Iberoamericano
en Ingeniería de Residuos
Hacia una economía circular

SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA EN SUPERFICIE DE VERTEDEROS EN ZONAS ÁRIDAS A TRAVÉS DEL ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT

Munizaga Plaza, Juan Antonio¹; Fernández San Martín, Luis²; Álvarez Ávalos, Gabriel²; Lobo García de Cortázar, Amaya³

¹Escuela de Prevención de Riesgos y Medio Ambiente, Universidad Católica del Norte, Larrondo 1281, 1781421 Coquimbo, Chile, juan.munizaga@ucn.cl

² Laboratorio de Percepción Remota, Depto. de Ingeniería en Geomensura y Geomática, Universidad de Antofagasta, Campus Coloso, Avda. Universidad de Antofagasta s/n, Antofagasta, Chile, luis.fernandez@uantof.cl

³ Grupo de Ingeniería Ambiental, Depto. de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Av. De Los Castros, s/n 39005 Santander, España, amaya.lopez@unican.es

Resumen

En este artículo se elabora y aplica una metodología de teledetección para el análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat para el seguimiento y evaluación de la temperatura de superficie terrestre (LST) en vertederos. Se analizaron dos casos prácticos emplazados en el desierto de Atacama, norte de Chile. El primer caso es el vertedero *La Chimba*, ubicado en la ciudad costera de Antofagasta, a 134 msnm, con un periodo de explotación de 50 años y en proceso de cierre. El segundo caso es el vertedero *Cerro Colorado*, ubicado en la ciudad de Calama, a 2.533 msnm, con un periodo de explotación de 12 años. Según información estadística disponible, se determinaron las cantidades de residuos depositados en los vertederos y su composición. Para la obtención de LST se utilizó la banda térmica de un conjunto de imágenes seleccionadas de la base de datos del USGS Earth Explorer (EE.UU.) entre 1987-2016, las cuales fueron procesadas geoméricamente, atmosféricamente y radiométricamente mediante el software geoespacial ERDAS Imagine®. Los resultados obtenidos muestran un bajo gradiente de LST media de 0,7 °C y 0,9 °C, respectivamente, entre la superficie de vertedero y los terrenos contiguos, debido posiblemente por la *momificación* de los residuos, provocada por la alta evapotranspiración del terreno, baja precipitación, salinidad del suelo, entre otros factores. Se ha comprobado la aplicabilidad y utilidad de la metodología para monitoreo de LST. Sin embargo, se ha puesto de manifiesto la dificultad de su aplicación para localización o seguimiento de vertederos en zonas áridas.

Palabras clave: *percepción remota, teledetección, residuos, biodegradación, rellenos sanitarios.*

1. Introducción

1.1 Problemática de vertederos de residuos sólidos

El vertido en tierra ha sido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la eliminación de residuos (Tchobanoglous, 1994), pero es la opción con mayor impacto ambiental y la última posibilidad contemplada dentro de la jerarquía de residuos, establecida en distintas normativas como, en Europa, por la Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE.

La eliminación incontrolada (a través de la descarga abierta y la quema a cielo abierto) era la norma en la gran mayoría de países hasta la década de 1960, y según el Banco Mundial sigue siendo habitual

en la mayoría de los países en desarrollo. Esta práctica da lugar a riesgos sustanciales para la salud pública y el medio ambiente, que aumentan significativamente en los casos en que se depositan residuos peligrosos en vertedero junto con residuos domésticos (GWMO, 2015). A pesar de esto, el relleno sanitario, vertedero o depósito controlado de residuos es el método más común de eliminación de residuos en países desarrollados (Manfredi, 2013).

1.2 Monitorización de vertederos mediante teledetección

El monitoreo realizado a vertederos controlados, a través del análisis de la toma de muestras y ensayo en laboratorio, permite caracterizar las propiedades bioquímicas y el contenido orgánico de los residuos para evaluar su potencial contaminante y su tasa de estabilización. Sin embargo, estos ensayos son complejos, requieren un tiempo extenso de análisis y equipos específicos (Cobo *et al.*, 2008). Para evitar estas dificultades y disminuir el coste asociado al monitoreo de vertederos, se han desarrollado otros métodos no convencionales, como la teledetección o percepción remota, que pueden utilizarse como un complemento al monitoreo realizado *in situ* (Ottavianelli *et al.*, 2005a, Iacoboaea y Petrescu, 2013, Yeung Yan *et al.*, 2014).

El primer análisis sobre la aplicación de la teledetección a la gestión de residuos fue publicado por Garofalo y Wobber (1974), que discuten la utilización de fotografías aéreas para apoyar la gestión de residuos. Su metodología se basa en la interpretación visual del uso de suelo y la incorporación de estos datos al diseño de sistemas de recogida, estimación de volúmenes de residuos generados, identificación de puntos de vertido, elección de nuevos sitios de eliminación, evaluación preliminar de posibles impactos ambientales e incluso en la evaluación de energía recuperable en vertederos.

En la actualidad, el desarrollo tecnológico en este campo permite realizar múltiples aplicaciones tales como: 1) estimación de cantidades de generación de residuos y caracterización, 2) apoyo a la selección del emplazamiento de vertederos, 3) gestión de residuos *in situ*, 4) monitoreo de vertederos y su evolución en el tiempo y 5) detección de sitios de vertido ilegal (Ottavianelli *et al.*, 2005b).

También se han desarrollado estudios relacionados con el comportamiento térmico de los residuos dentro del vertedero. Yesiller *et al.* (2005) señala que este comportamiento depende principalmente de la descomposición de los residuos, que provoca un incremento de la temperatura de manera diferente durante los procesos de digestión aerobia y anaerobia. Por otro lado, algunos autores han comparado la temperatura de la superficie terrestre (LST) promedio de vertederos y sus terrenos contiguos, obteniendo diferencias entre 2 °C – 8 °C (Iacoboaea y Petrescu, 2013), 4 °C – 10 °C y 5 °C – 11,5 °C (Yeung Yan *et al.*, 2014). La LST media de vertederos obtenida fue siempre mayor que los valores de terrenos circundantes.

El presente estudio busca demostrar la aplicabilidad de la teledetección para medir la LST de vertederos de residuos en zonas áridas. Se formula como hipótesis inicial que si la degradación en zonas áridas de la materia orgánica presente dentro del vertedero y su liberación de calor se ve ralentizada, entonces la aplicación de esta herramienta de seguimiento podría estar limitada.

2. Metodología

La metodología propuesta se aplicó a dos casos situados en el desierto de Atacama, norte de Chile: el vertedero *La Chimba*, ubicado en la ciudad costera de Antofagasta, a 134 msnm, con una precipitación media anual de 3,7 mm, temperatura media anual de 18 °C (registro 1969–2016, estación meteorológica UCN), con un clima desértico con nublados abundantes y el vertedero *Cerro Colorado*, ubicado al interior de la misma región, en la ciudad de Calama, a 2.533 msnm, con una precipitación media anual de 4,7 mm, 13 °C de temperatura media anual (registro 2004–2016, estación meteorológica El Loa), con un clima desértico marginal de altura.

En el primer caso, se depositaron residuos desde 1966 hasta la actualidad. Inicialmente funcionó como un botadero a cielo abierto, sin aplicar ningún tratamiento previo al vertido (Munizaga, 2009). Hoy en día, convertido en un vertedero controlado, se encuentra en proceso de cierre y abandono. A lo largo de los años, este vertedero ha ido recibiendo todo tipo de residuos domésticos, residuos industriales y residuos de la construcción y demolición.

De acuerdo al estudio elaborado por AMPHOS 21 (2016), el vertedero se emplaza sobre una superficie de 70,6 ha y posee un volumen total de residuos depositados hasta 2016 de 5.602.109 m³. Se identifican cuatro áreas donde se han depositado residuos domésticos, PR1: 830.042 m³, PR2: 1.277.465 m³ (color verde) e industriales, PR3: 2.394.729 m³, PR4: 1.099.873 m³ (color rojo) (ver Figura 1). A pesar de que el lugar no ha dispuesto de un seguimiento adecuado, a lo largo de los años no se han registrado incidentes relacionados con lixiviados o biogás, señal de que la emisión de contaminantes es poco significativa.



Figura 1. Áreas en estudio y puntos de referencia considerados para determinar la LST en el vertedero de *La Chimba*, Antofagasta (Izquierda) y *Cerro Colorado*, Calama (derecha), Chile

En el segundo caso, la eliminación de residuos domésticos se ha realizado desde 2004 hasta la actualidad (ver Figura 1). Ha sido diseñado y operado desde un inicio bajo la normativa chilena como un relleno sanitario o vertedero controlado, encontrándose en plena explotación y en fase de expansión, debido a su porcentaje de colmatación de 90%. Este se emplaza sobre una superficie de 12 ha, con un volumen depositado acumulado al año 2016 de 736.518 m³. Recibe todo tipo de residuos domésticos generados en la ciudad de Calama y localidades cercanas de tipología rural. Posee un sistema de recolección de lixiviados con una balsa de recepción que permanecen vacía, al no recibir líquido y chimeneas de migración pasiva para el control del posible biogás generado, pero sin un sistema detección y medición de concentración de metano, para eventualmente ser quemado.

Los datos sobre composición de residuos depositados en vertedero muestran que *Cerro Colorado* posee el mayor porcentaje en peso de 51,3% de residuos rápidamente degradables. Estos se han depositado recientemente y se encuentran en la etapa inicial de descomposición. De acuerdo a AMPHOS 21 (2016), en la zona PR2 del vertedero *La Chimba* existe una fracción de 41,5% de orgánico fino y grueso, estabilizados en fase final de degradación. Por otro lado, se observa en esta misma zona, el mayor porcentaje en peso de 57,5% de materiales reciclables (por ejemplo, papel/cartón, textil, madera, gomas/cauchos, plástico, metal y vidrio). En la zona PR1 de *La Chimba* el contenido de materia orgánica es menor, del 33%.

El régimen de aridez, basado en la longitud de la estación seca y la distribución del déficit hídrico a lo largo del año, señala para ambos casos un tipo xérico (CAZALAC, 2010), caracterizado por una escasa precipitación y una alta evapotranspiración, lo que se traduce en una descomposición muy lenta o casi inexistente del residuo. Esto se demuestra por la reducida aparición de lixiviados y biogás.

Para determinar la LST de las áreas de depósito de residuos y áreas próximas al vertedero, en ambos casos se seleccionaron cuatro puntos superficiales dentro de los vertederos identificados como PR1, PR2, PR3 y PR4. También, se consideraron cuatro puntos superficiales fuera del vertedero, identificados como PR5, PR6, PR7 y PR8, con un espaciamiento adecuado a la resolución geométrica de las imágenes Landsat (ver Figura 1).

El proceso de cálculo que se propone en este estudio, puede dividirse en tres etapas: 1) obtención, selección y fusión de las imágenes, 2) corrección geométrica, atmosférica y radiométrica y 3) radiancia, reflectividad, temperatura de brillo y emisividad.

Las imágenes utilizadas en el estudio fueron adquiridas de la base de datos EarthExplorer del USGS de los EE.UU., obteniendo imágenes del satélite Landsat 5, 7 y 8, sensores TM, ETM+, OLI/TIRS. Las 15 imágenes finales se seleccionaron mediante criterios de disponibilidad, temporalidad y presencia de nubosidad. Además, para la obtención del NDVI y posterior cálculo de emisividad, se realizó la unión de las bandas multispectrales 3 y 4 de los satélites Landsat 5 y 7, y de las bandas 4 y 5 del Landsat 8, de acuerdo a su longitud de onda respectivamente.

A modo de aminorar distorsiones ocurridas durante el registro de las imágenes, se realizó una corrección geométrica para reubicar las imágenes en un mismo patrón geográfico (Datum WGS84), mediante puntos de control obtenidos de una imagen del sector previamente georreferenciada a un punto en el terreno (Fernández *et al.*, 2012). Para ello se utilizó un polinomio de segundo grado, utilizando el método del vecino cercano para su remuestreo.

El siguiente paso fue corregir atmosféricamente las imágenes aplicando método de pixel oscuro (Chávez, 1988) implementado en software ENVI®. Para conseguir una escala radiométrica común, se convirtieron los niveles digitales a radiancia y reflectividad siguiendo la metodología propuesta por Chander *et al.* (2009) para imágenes TM y ETM+, y la metodología propuesta por Vermote *et al.* (2016) para imágenes OLI/TIRS. En cuanto al cálculo de emisividad, se utilizó la metodología propuesta por Sobrino *et al.* (2004). Para la obtención de la temperatura de brillo (Wang *et al.*, 2016), se utilizaron los parámetros de calibración señalados por Chander *et al.* (2009) para sensor TM y ETM+, mientras que para las imágenes del sensor OLI/TIRS se obtuvieron de los metadatos. Finalmente se calcula la LST por medio de la Ley de Stefan Boltzman (Van y Bao, 2015).

Los resultados obtenidos de la LST para ambos vertederos en estudio se muestran en las Tablas 1 y 2. Se observan temperaturas medias de 29,5 °C (SD: 7,3 °C, SEM: 1,1 °C) y 35,1 °C (SD: 5,6 °C, SEM: 1,4 °C) en los vertederos *La Chimba* y *Cerro Colorado*, respectivamente.

En general se identifican las temperaturas más altas en las estaciones de verano y primavera. Existen diferencias en torno a 0,7 °C y 0,9 °C en LST medias dentro y fuera de los vertederos *La Chimba* y *Cerro Colorado*, respectivamente. En algunos casos, se observan los valores de mayor temperatura fuera del vertedero, posiblemente debido al tipo de suelo que posee una mayor conductividad térmica, entre otros factores. En relación a las LST medias dentro y fuera de las zonas de vertido de residuos domésticos, la zona PR2 del vertedero de *La Chimba* posee la diferencia de LST media más alta de 1,7 °C. Posiblemente esto se debe al ser el área de vertido con mayor volumen de residuos domésticos depositados, aunque como se comentó anteriormente, la mayoría de sus residuos son antiguos. Por otro lado, si se comparan las LST obtenidas dentro de los vertederos con la temperatura media diaria del aire (obtenidas de estaciones meteorológicas cercanas), se observan diferencias medias en torno a 13 °C y 21 °C, respectivamente. Estos valores pueden estar influenciados directamente por la altitud, radiación solar y características atmosféricas de la zona de emplazamiento de los vertederos.

Tabla 1. LST sobre el vertedero *Cerro Colorado* y temperatura del aire en grados Celsius

Estación del año	Fecha captura de imagen	Puntos dentro del vertedero				Puntos fuera del vertedero				Temperatura del aire		
		PR1 (°C)	PR2 (°C)	PR3 (°C)	PR4 (°C)	PR5 (°C)	PR6 (°C)	PR7 (°C)	PR8 (°C)	\bar{x} (°C)	Máx. (°C)	Mín. (°C)
invierno	01/08/05	26,2	25,8	27,1	25,8	24,5	25,4	25,4	25,8	13,3	26,4	3,8
primavera	01/12/08	40,2	41,7	40,6	41,3	44,6	45,0	38,4	40,2	14,8	24,2	3,2
primavera	23/11/11	36,5	34,9	36,1	37,2	42,4	39,5	38,7	40,2	15,2	26,4	3,6
invierno	14/06/16	35,8	36,4	37,1	38,4	37,6	38,3	35,4	34,7	12	22,8	3,2

Tabla 2. LST sobre el vertedero *La Chimba* y temperatura del aire en grados Celsius

Estación del año	Fecha captura de imagen	Puntos dentro del vertedero				Puntos fuera del vertedero				Temperatura del aire		
		PR1 (°C)	PR2 (°C)	PR3 (°C)	PR4 (°C)	PR5 (°C)	PR6 (°C)	PR7 (°C)	PR8 (°C)	\bar{x} (°C)	Máx. (°C)	Mín. (°C)
verano	22/01/87	38,1	37,7	36,5	37,3	39,2	36,9	36,1	39,2	20,5	24,4	17,1
invierno	09/07/90	18,3	16,5	16,9	17,4	17,8	15,5	16,0	17,8	13,2	15,6	11,8
invierno	02/08/93	19,2	18,8	18,3	18,8	20,1	16,9	17,8	19,2	13,7	17,4	11,9
invierno	11/09/96	26,7	26,2	25,4	26,7	27,9	25,0	25,8	26,7	14,6	17,2	13,4
primavera	01/12/99	36,8	36,8	36,8	36,5	31,1	36,1	36,1	38,8	17,7	21,7	13,9
primavera	09/12/02	36,6	35,2	34,7	36,1	37,0	33,7	35,2	37,0	18,7	21,9	14,6
invierno	01/08/05	21,4	21,0	20,6	21,0	21,4	20,6	21,0	21,9	13,5	16,3	11,1
primavera	01/12/08	34,2	31,8	33,4	33,4	34,9	33,0	-	34,9	18,5	21,3	16,0
primavera	23/11/11	33,4	33,8	33,0	33,0	33,8	33,4	33,4	35,3	17,3	19,5	15,7
primavera	18/12/14	32,0	33,7	33,7	33,2	33,8	-	33,7	35,8	17,8	20,4	15,8
invierno	14/06/16	31,7	33,0	33,3	31,5	33,8	32,6	32,2	33,7	13,4	17,3	10,6

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos de LST de vertederos en zonas áridas son preliminares, por lo tanto no son concluyentes y requieren de mediciones *in situ* y más casos de aplicación. La reducida diferencia de temperaturas encontrada entre zonas de acumulación de residuos y terreno puede ser debido a la posible *momificación* de los residuos depositados, provocada principalmente por la extrema aridez de la región, caracterizada por la alta evapotranspiración del terreno, baja precipitación, salinidad del suelo, entre otros factores. A pesar de ello, se ha comprobado la aplicabilidad de la metodología para el monitoreo de la LST de los vertederos, pues toda la información requerida puede estar disponible, lo que demuestra que la metodología es útil, aunque requiere de expertos en teledetección para el procesamiento de las imágenes. En todo caso los resultados obtenidos ponen en duda su utilidad para localización o seguimiento de vertederos en zonas áridas, donde la degradación es muy escasa o nula.

Referencias

- Amphos 21, 2016. Plan de Remediación y Recuperación Vertedero La Chimba, ciudad de Antofagasta. Presentación alternativas definitivas. Ilustre Municipalidad de Antofagasta.
- CAZALAC, 2010. Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. Documento Técnico del PHI-LAC, N°25, ISBN: 978-92-9089-164-2.
- Cobo, N., López, A., Lobo, A., 2008. Biodegradation stability of organic solid waste characterized by the environment IV. International conference on waste management and the environment, pp. 153–162.

- Chander, G., Markham, B., Helder, D., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO/1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*. 113 (5), 893/903.
- Chávez, P.S., 1988. An improved dark/object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*. 24 (1988), pp. 459–479.
- Directiva 1999/21/CE, del consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos.
- Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE, del Parlamento Europeo y del consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos.
- Fernández, L., Álvarez, G., Salinas, R., 2012. Impact area determination of pyroclastic deposits in Lascar volcano, eruptive process in the year 1993. *Natural Hazards*. Vol. 60 (2), pp. 747–760.
- Garofalo, D., Wobber, F., 1974. Solid Waste and Remote Sensing. *Photogrammetric Engineering*. Vol. 40, No. 1, pp. 45-59.
- GWMO, 2015. Global Waste Management Outlook (GWMO). International Environmental Technology Centre, United Nations Environmental Programme.
- Iacoboaia, C., Petrescu, F., 2013. Landfill monitoring using remote sensing: a case study of Glina, Romania. *Waste Management & Research*, Vol 31, Issue 10.
- Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T. H., 2009. Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, November, 27 (8), pp. 825-836.
- Munizaga Plaza, J. A., 2009. Prefactibilidad Técnica de un Vertedero Controlado de Alta Densidad para la ciudad de Antofagasta, Chile. UNIA/RESUR. p. 226, ISBN: 978-84-7993-073-8.
- Ottavianelli, G., Hobbs, S., Smith, R., Bruno, D., 2005a. Assessment of hyperspectral and SAR remote sensing for solid waste landfill management. Conference proceedings of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 21–23 March, ESRI, Frascati, Italy, ESA SP/593, June, 2005.
- Ottavianelli, G., Hobbs, S., Smith, R., Bruno, D., 2005b. Assessment of hyperspectral and SAR remote sensing for solid waste landfill management. Oral presentation in the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 21–23 March, ESRI, Frascati, Italy, ESA SP/593, June, 2005.
- Sobrino, J. A., Jiménez/Muñoz, J. C., Paolini, L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, 90(4), pp. 434-440.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil S., 1993. *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw/Hill. Nueva York, EUA, p. 408.
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B., 2016. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*.
- Van, T. T., Bao, H. D. X., 2015. Characteristics of Urban Thermal Environment from Satellite Remote Sensing Data in Ho Chi Minh City, Vietnam. 1° International Electronic Conference on Remote Sensing.
- Wang, S., Ma, Q., Ding, H., Liang, H., 2016. Detection of urban expansion and land surface temperature change using multi/temporal landsat images. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Yesiller, N., Hanson, J.L., Oettle, N.K., Liu, W. L., 2008. Thermal analysis of cover systems in municipal solid waste landfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(11), 1655–1664.
- Yeung Yan, W., Mahendrarajah, P., Shaker, A., Faisal, K., Luong, R., Al/Ahmad, M., 2014. Analysis of multi/temporal landsat satellite images for monitoring land surface temperature of municipal solid waste disposal sites. *Environ Monit Assess* (2014) 186, pp. 8161–8173.