

Estimación del volumen de lixiviado generado en el vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina mediante balance hídrico

Estimation of the volume of leachate generated in La Mina urban solid waste landfill with a water balance

I. Vadillo y F. Carrasco

Grupo de Hidrogeología. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga. 29071-Málaga. vadillo@uma.es

ABSTRACT

Values of leachate production in the urban solid waste landfill of La Mina (Marbella) are certainly an unknown parameter, because of its uncontrolled situation. It has been necessary an estimation of the volume of leachate with the application of a water balance. For doing so, the inflow (precipitation) and outflows of water (evaporation, infiltration to the aquifer and discharge to the surface) have been recognized. A daily calculation of evapotranspiration jointly with the recorded daily rainfall and the areal surface of the landfill yielded the total volume of water (i.e.: leachate) produced during the study period (October 1994 - September 1999). The annual average is between 26.087 m³ and 28.706 m³, with absolute values of 50.000 m³ in wet years and less than 1.000 m³ in dry years. For the research period the whole amount of leachate has been estimated in a range between 143.530 m³ (0'8 L/s) and 130.434 m³ (0'9 L/s). Temporal evolution of leachate generation with values from the water balance method do not reflect leachate production in dry years and/or months, but this statement differs slightly with what it was observed in the field, because during dry periods a constant drainage of leachate (0'1-0'5 L/s) is produced. This is an indication of storage of leachate inside the landfill, something that has been confirmed in the constant leachate level inside the piezometers.

Key words: water balance, inflows and outflows, leachate, La Mina landfill, volume of leachate

*Geogaceta, 37 (2005), 139-142
ISSN:0213683X*

Introducción

El mayor problema medioambiental de los vertederos de residuos sólidos urbanos es el impacto producido por la infiltración de los lixiviados en las aguas subterráneas (Baedecker y Back, 1979; Christensen *et al.*, 2001; Vadillo, 2003). La masa de contaminante que produce el vertedero depende de la concentración de los elementos en el lixiviado y del volumen de lixiviado generado en el tiempo. En los vertederos incontrolados no suelen existir medidas de la producción de lixiviado, por lo que una forma de estimar el volumen de lixiviado es mediante la realización de un balance hídrico.

En el presente trabajo se caracterizan los diferentes componentes del balance hídrico en el vertedero de residuos urbanos de La Mina (Marbella). Ello permitirá, junto con el cálculo del área de vertido para cada año, cuantificar el volumen de lixiviado generado a lo largo de los últimos años de actividad como vertedero incontrolado (1994-1999).

Enclave geográfico e historia del vertido

El vertedero de La Mina se localiza a 60 Km al Oeste de la ciudad de Málaga y está emplazado al Norte de la localidad de Marbella (Fig. 1). Comenzó su activi-

dad en el año 1975 y finalizó durante el mes de Diciembre de 1999.

Los residuos son de origen urbano pero el carácter incontrolado del vertedero permitió la acumulación de otro tipo de residuos (Vadillo, 2003). El volumen aproximado de basura (650.000 m³) se ha calculado a partir del espesor medio de residuo atravesado durante las perforaciones realizadas en la etapa de clausura (12 m), y la extensión al final de su explotación (54.000 m²).

Evolución del área de vertido

El área en los vertederos incontrolados aumenta anualmente y con ello la superficie expuesta para la infiltración del agua de lluvia. Para cuantificar el volumen de lluvia sobre el vertedero se han recopilado las fotos aéreas disponibles del borde meridional de Sierra Blanca, lo que ha permitido planimetrar el área del vertedero y conocer su evolución (Tabla I y Fig. 1).

La superficie ha aumentado desde 14.000 m² en 1985 hasta 54.250 m² en el año 1999. La relación entre el área de vertido y la población para esos mismos años (Tabla I y Fig. 2) permite calcular la extensión areal del vertedero a partir de los censos poblacionales (Ecuación 1), lo que ha permitido calcular el volumen de lluvia caída sobre él durante los años en los

que no se ha dispuesto de fotos aéreas.

Área del vertedero = 2,148 • Habitantes – 163.401 [1]

Recopilación y tratamiento de datos climatológicos. Métodos de cálculo de evapotranspiración potencial

Se han recopilado variables meteorológicas de las estaciones de Puerto Banús, Marbella y Aeropuerto de Málaga (Fig. 1 y Tabla II). La recopilación de variables de la estación del Aeropuerto de Málaga se ha justificado porque alguno de los métodos empleados para el cálculo diario de la evapotranspiración potencial requerían variables que no se podían obtener de estaciones meteorológicas de la zona de Marbella. Antes de proceder a esto último, se ha verificado la analogía climatológica entre las tres estaciones, realizando un estudio comparativo de las variables comunes entre ellas.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se ha escogido la ecuación de Penman, que es la recomendada por la FAO como método estándar para determinar la ETP a partir de datos meteorológicos (Allen *et al.*, 1998). También se han seleccionado los métodos de Blaney-Criddle (Doorenbos y Pruitt, 1975), Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1982) y

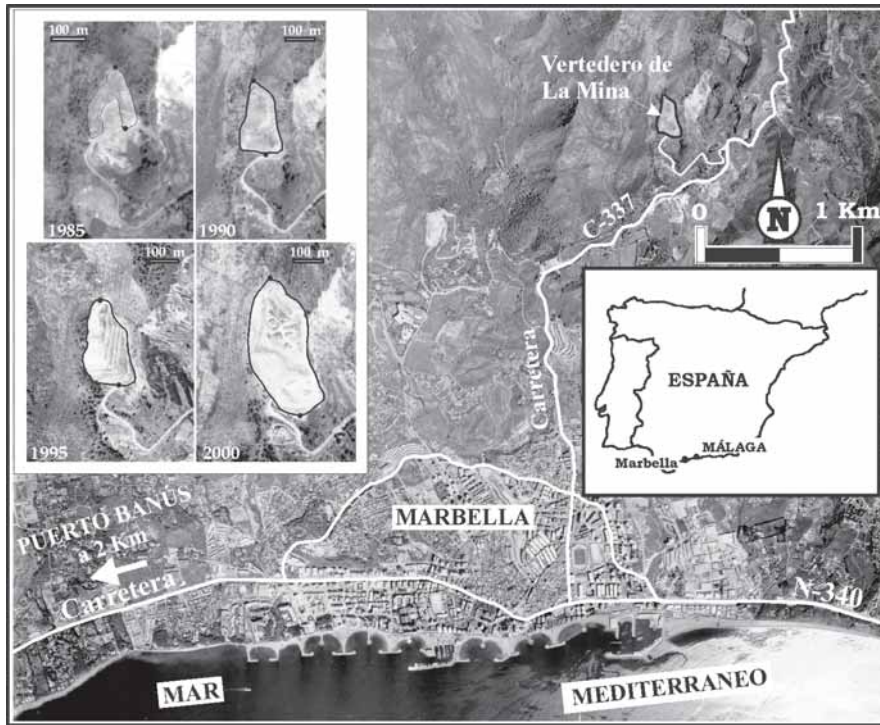


Fig. 1.- Geographical situation of the research area and emplacement of La Mina landfill. Aerial photographs of the landfill show the evolution during the last 15 years. A graphical scale is shown for the years of activity. Distances between the marks (black points) correspond to 180 m (year 1985), 240 m (year 1990), 300 m (year 1995) and 480 m (year 2000).

Fig. 1.- Geographical situation of the research area and emplacement of La Mina landfill. Aerial photographs of the landfill show the evolution during the last 15 years. A graphical scale is shown for the years of activity. Distances between the marks (black points) correspond to 180 m (year 1985), 240 m (year 1990), 300 m (year 1995) and 480 m (year 2000).

Turc (1961), además del método de Thornthwaite (1948), ya que son métodos comúnmente utilizados para el cálculo de evaporación potencial.

Resultados y discusión

Flujos de entrada y de salida en el vertedero de La Mina

A partir de los flujos teóricos en un vertedero de residuos (Fig. 3A), se han reconocido los flujos de entrada y salida existentes en el vertedero de residuos sólidos de La Mina. Así, (1) no existe impermeabilización en la base del vertedero, lo que provoca infiltración (Per) del lixiviado hacia el acuífero; (2) no se realizaban cubrimientos de la basura con material impermeable, lo que unido a la disposición horizontal de las capas de residuo, ha impedido la existencia de escorrentía de cobertera (ESC cob) y ha facilitado el aumento de la infiltración (Inf) del agua de lluvia; (3) no se ha irrigado el residuo con los lixiviados (Irr); (4) no se han vertido lodos o fangos de depuradora (L+F); (5) no ha existido una capa vegetal permanente que produjera transpiración (Trans) y (6) no ha sido posible la entrada de agua del subsuelo

(Asub), porque el nivel piezométrico está situado a varias decenas de metros por debajo de la base del vertedero y las variaciones estacionales son inferiores a esa cifra. Además, la limitada cuenca vertiente (0'41 km²), formada por mármoles calizos y dolomíticos con un lapiaz desarrollado, la existencia de vegetación en la cuenca y la ausencia de suelo, limita la

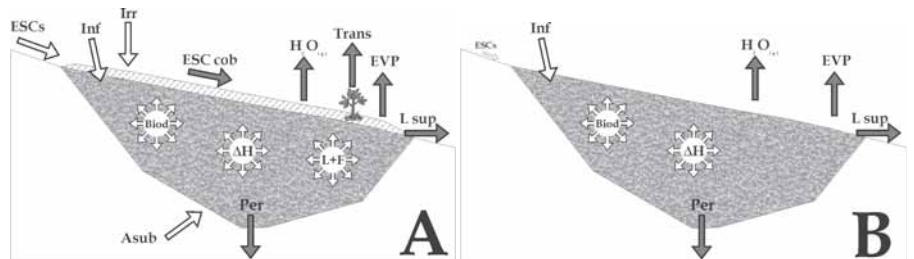


Fig. 3.- A: Theoretical inflows (white arrows) and outflows (grey arrows) of waters in a sanitary landfill. B: Deduced flows in La Mina landfill. Legend, ESCs: Runoff, Asub: Groundwater, Inf: Infiltration of precipitation, Biod: Biodegradation, DH: Changes in Humidity, Irr: Watering of leachates, L+F: Muds, EVP: Evaporation, Per: Percolation, Lsup: Surface drainage of leachate, Esc cob: Runoff in landfill cover, Trans: Transpiration, H₂O_(g): Water vapour.

Fig. 3.- A: Theoretical inflows (white arrows) and outflows (grey arrows) of waters in a sanitary landfill. B: Deduced flows in La Mina landfill. Legend, ESCs: Runoff, Asub: Groundwater, Inf: Infiltration of precipitation, Biod: Biodegradation, DH: Changes in Humidity, Irr: Watering of leachates, L+F: Muds, EVP: Evaporation, Per: Percolation, Lsup: Surface drainage of leachate, Esc cob: Runoff in landfill cover, Trans: Transpiration, H₂O_(g): Water vapour.

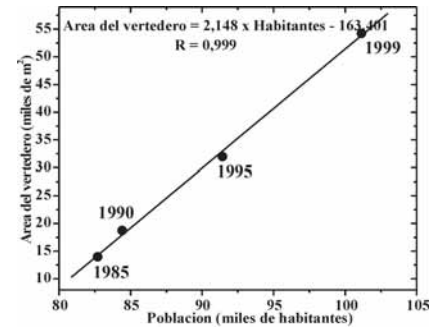


Fig. 2.- Correlación del área del vertedero con la población del municipio de Marbella.

Fig. 2.- Correlation between the areal extension of the landfill and the population of Marbella municipality.

concentración de flujos de aguas de arroyada durante la mayoría de los episodios lluviosos. Por tanto, el flujo de entrada al vertedero en forma de escorrentía superficial (ESCs) es muy limitado.

De todos los elementos que concurren en el vertedero de La Mina (Fig. 3B), las entradas y salidas por factores inherentes al residuo, como la biodegradación (Biod) o el vapor de agua eliminado a la atmósfera (H₂O_(g)), son despreciables frente al resto de factores. El principal flujo de entrada es la infiltración de la precipitación (Inf) y como únicos flujos de salida destacan la evaporación (EVP), percolación (Per), descarga superficial de lixiviado (Lsup) y variación de la humedad en el seno del residuo (DH), aunque en este último caso sólo es un proceso a considerar en los primeros centímetros de profundidad y en vertederos jóvenes (Booth y Price, 1989; Bendz *et al.*, 1997) por lo que en el vertedero de La Mina con una vida activa de más de 20 años, se considera que se ha alcanzado el máximo almacenamiento de agua. La principal con-

Año	Población anual (habitantes)	Área de vertido (m ²)
1975	54.674	-
1981	67.822	-
1985	82.696	14.000
1990	84.410	18.750
1994	89.665	29.199
1995	91.416	32.000
1996	93.640	48.871
1997	96.000	50.000
1998	98.377	52.000
1999	101.144	54.250
2000	105.910	54.250

Tabla I.- Evolución de la población en el Municipio de Marbella y la extensión del vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina (Fig. 1) desde el inicio del vertido (1975) hasta su clausura (2000). El dato de población para el año 1997 se ha interpolado a partir de la serie de valores. Las áreas para los años 1996, 1997 y 1998 son el resultado de aplicar la ecuación 1.

Table I.- Evolution of population in Marbella municipality and of areal extension of La Mina urban solid waste landfill (Fig. 1) since the beginning of the activity (1975) until its closure (2000). The value for the year 1997 has been interpolated. Areas for years 1996, 1997 and 1998 are the results of the application of equation 1.

secuencia es que la humedad (DH) en las zonas menos superficiales del vertedero sería independiente de la estación del año, generando una descarga continua de lixiviado. Este último aspecto se ha podido constatar en el campo, con la observación de caudales casi constantes de lixiviado durante las épocas de estiaje.

Volumen de lixiviado generado

Se ha aplicado la ecuación de balance hídrico deducida para el vertedero de residuos sólidos de Marbella (Ecuación 2):
 $P = EVP + Per + Lsup$ [2]
 siendo P la precipitación, EVP la evapo-

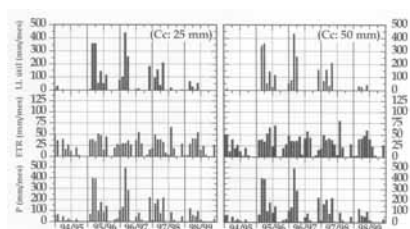


Fig. 4.- Evoluciones mensuales de la precipitación (P), evapotranspiración real (ETR) y lluvia útil (Llútil) durante el periodo Octubre 1994-Septiembre 1999, para hipótesis de campo de 25 y 50 mm.

Fig. 4.- Monthly evolutions of precipitation (P), Real evapotranspiration (ETR) and net rainfall (Llútil) during the period October 1994 - September 1999, for 25 and 50 mm of field capacities.

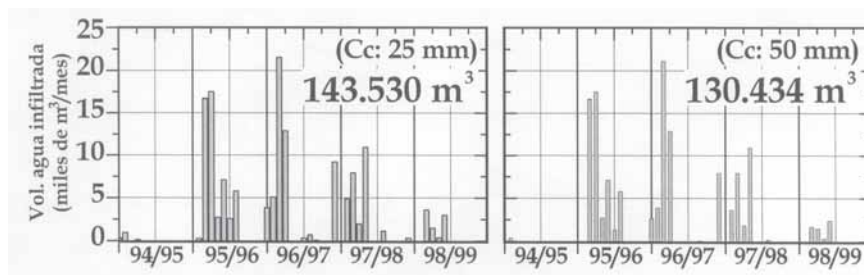


Fig. 5.- Lixiviado generado en el vertedero de La Mina durante el periodo Octubre 1994-Septiembre 1999 para las hipótesis de reserva de 25 y 50 mm.

Fig. 5.- Volume of leachate produced in La Mina landfill during the period October 1994 - September 1999 for field capacities of 25 and 50 mm.

ración, Per la percolación del lixiviado por la base del vertedero y Lsup el lixiviado que drena el vertedero en superficie. Al no existir procesos de escorrentía en la superficie del vertedero, toda la lluvia útil generada se infiltrará y producirá lixiviado, y la salida del sistema sólo se producirá mediante percolación por la base del vertedero o por salida superficial:

$$\text{Lluvia Útil} = \text{Per} + \text{Lsup} \quad [3]$$

El tratamiento se realizó con los datos diarios de la estación de Marbella y abarca desde el año hidrológico 1994/95, momento en el que se inicia la investigación, hasta el año 1998/99, durante el cual se produce la clausura definitiva del vertedero. A partir de la ETP diaria y los datos de precipitación se calculó la Evaporación real (ETR) y la lluvia útil (Llútil), adoptando las hipótesis de reserva de 25 y 50 mm. Con este último componente del balance hídrico y el área de vertido anual (Ecuación 3 y Tabla I), se ha calculado el volumen de agua infiltrada sobre el vertedero a escala diaria, pero para facilitar una visión general de la evolución de los parámetros, en las figuras se han representado las evoluciones mensuales y en la

tabla resumen los valores para cada uno de los años hidrológicos del periodo de estudio (Tabla III , Fig. 4).

El volumen medio anual de agua infiltrada (lixiviado) generada para el periodo Oct94-Sep99 se sitúa entre 26.087 y 28.706 m³, aunque existe una gran variación entre los años (Tabla III). En los años húmedos (1995/96 y 1996/97) se puede generar cerca de 50.000 m³ de lixiviado anuales, mientras que en el resto de años la producción desciende por debajo de 30.000 m³, con una muy baja producción de lixiviado en los años de sequía al inicio de la investigación (1994/95).

El volumen total de lixiviado durante el periodo de investigación varía entre 143.530 m³ y 130.434 m³ para cada hipótesis de reserva considerada y para el periodo desde Octubre 1994 hasta Septiembre 1999 (Fig. 5). Estos volúmenes se corresponden con un caudal medio constante de salida entre 0'8 y 0'9 L/s.

El volumen de lixiviado muestra grandes variaciones mensuales, debido a su dependencia estacional con respecto a la precipitación. Según los cálculos realizados, sólo se produciría lixiviado duran-

ESTACIÓN	Latitud	Longitud	Cota (m)	Variables recopiladas
Puerto Banús	36° 29' 00''	04° 58' 00''	6	P, T, V
Marbella	36° 30' 30''	04° 53' 00''	20	P, T, In
Aeropuerto de Málaga	36° 40' 00''	04° 29' 17''	7	H, Tv, Pr, Pa

Tabla II.- Características generales y variables meteorológicas de las estaciones de control meteorológico. P-precipitación diaria; T-temperatura máxima y mínima diaria; V-velocidad y dirección del viento; H-humedad (0, 7, 13 y 18 horas); Tv-Tensión de vapor (0, 7, 13 y 18 horas); Pr-Punto de rocío (0, 7, 13 y 18 horas); Pa-Presión atmosférica (0, 7, 13 y 18 horas); In-Insolación.

Table II.- General characteristics and parameters of the meteorological stations. P-daily precipitation; T-maximum and minimum temperature; V-velocity and direction of wind; H-Humidity (0, 7, 13 y 18 hours); Tv-Vapor tension (0, 7, 13 y 18 hours); Pr-Dew point (0, 7, 13 y 18 hours); Pa-atmospheric pressure (0, 7, 13 y 18 hours); In-Insolation.

ESTACIÓN DE MARELLA									Volumen infiltrado en el vertedero		
		CC: 25 mm				CC: 50 mm			CC: 25 mm	CC: 50 mm	
P	ETP	ETR	Llútil	Llútil	ETR	Llútil	Llútil	mm	mm	m ³	m ³
mm	mm	mm	mm	%	mm	mm	%				
1994/95	253	1.112	206	47	25	239	14	21	1.371	400	
1995/96	1.420	1.071	323	1.097	68	374	1.046	71	52.691	51.060	
1996/97	1.404	1.073	294	1.086	51	374	983	52	53.614	48.490	
1997/98	858	1.030	308	533	53	354	481	53	27.209	24.538	
1998/99	411	996	248	159	34	297	110	31	8.644	5.945	
MEDIA	869	1.056	276	585	46	328	527	46	28.706	26.087	

Tabla III.- Valores anuales de los componentes del balance hídrico en la estación de Marbella para el periodo 1994/95-1998-99 con hipótesis de campo de 25 y 50 mm y volumen de lixiviado generado en el vertedero de La Mina de acuerdo a los volúmenes de lluvia útil calculados.

Table III.- Annual values of the different factors of the water balance in the Marbella meteorological station for the period 1994/95-1998-99 with field capacities of 25 and 50 mm and volume of leachate in La Mina landfill according to the net rainfall.

te eventos pluviométricos, el resto de los días el caudal de lixiviado sería nulo. Esto difiere de la realidad porque, de acuerdo a las observaciones de campo, durante el año 1994/95 (Tabla III) con valores de lluvia útil de menos de 50 mm y durante las épocas de estiaje en el resto de los años, se produce descarga visible de lixiviado, aunque con caudales inferiores a 0'1 L/s. Además, también se ha comprobado que en los periodos invernales con ausencia de lluvia, la descarga era cercana a 0'5 L/s.

Como los caudales de lixiviado superficial son una parte del lixiviado generado, debe seguir existiendo percolación hacia el acuífero aún en años y/o épocas secas. Esto está apoyado por el hecho de la existencia de una zona saturada de lixiviado en el interior del vertedero (Vadillo *et al.*, 2004).

Se ha relacionado la precipitación mensual en la estación de Marbella con el volumen de lixiviado infiltrado en el ver-

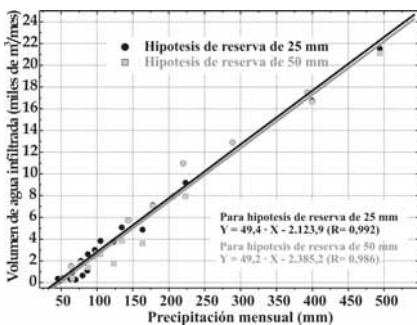


Fig. 6.- Relación entre la precipitación mensual y el volumen de agua infiltrada en el vertedero para hipótesis de campo de 25 y 50 mm. Leyenda: N = número de meses con lluvia útil generada, R = coeficiente de correlación.

Fig. 6.- Relation between the monthly rainfall and the volume of water generated in the landfill for 25 and 50 mm of field capacities. Legend: N = number of months with net rainfall, R = correlation coefficient.

tedero de La Mina (Fig. 6). Las correlaciones se han realizado con los meses en los que se ha producido excedentes de lluvia para la hipótesis de reserva de 25 y 50 mm. Esta correlación permite una estimación directa del volumen de lixiviado generado mensualmente en el vertedero en situaciones en las que la medida directa del caudal de lixiviado o la ausencia de alguno de los flujos de salida es difícil de estimar.

Conclusiones

Debido al carácter incontrolado del vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina (Marbella), no es posible realizar la medida directa del volumen de lixiviado producido. El único método posible para estimar el volumen de lixiviado generado es reconocer los flujos de entrada y salida de agua en el vertedero y aplicar la ecuación de balance hídrico.

Un estudio histórico mediante fotos aéreas de la zona de estudio, de los métodos de gestión del vertedero, del residuo depositado en él y de su entorno físico han permitido reconocer los flujos predominantes en el vertedero de La Mina y calcular los volúmenes de entrada (infiltración del agua de lluvia) y de salida (evaporación, percolación hacia el acuífero y descarga superficial de lixiviado). El volumen medio anual de lixiviado generado para el periodo de estudio se encuentra en un rango entre 26.087 y 28.706 m³, con valores máximos de 50.000 m³ en años húmedos y de menos de 1.000 m³ durante los años secos del periodo de investigación. El volumen total de lixiviado ha variado entre 143.530 m³ y 130.434 m³, lo que se corresponde con un caudal medio constante de salida de entre 0'8 y 0'9 L/s. Las evoluciones temporales del volumen de lixiviado difieren de la realidad ya que no estiman producción de lixi-

viado en años y/o épocas sin recarga de lluvia y, por el contrario, en observaciones de campo se ha observado una descarga constante de lixiviado (0'1-0'5 L/s). Esto es indicativo de la acumulación de lixiviado en el seno del residuo, aspecto posteriormente comprobado en el reconocimiento de una zona saturada de lixiviado en las perforaciones de piezómetros en el interior del vertedero.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el seno del grupo de investigación "Grupo de Hidrogeología" de la Junta de Andalucía (RNM-308) y es una contribución a los proyectos REN2002-01797/HID y REN2003-01580/HID de la DGI.

Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper*, No. 56, FAO, Rome, 300 p.

Baedecker, M.J. y Back, W. (1979). *Ground Water*, 17, 429-437.

Bendz, D.J., Singh, V.P. y Akesson, M. (1997). *Journal of Hydrology*, 203, 1-10.

Booth, C.J. y Price, B.C. (1989). *Journal of Hydrology*, 108, 175-188.

Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Bjerg, P., Jensen, D.L., Christensen, J.B., Baun, A., Albrechtsen, H. y Heron, G. (2001). *Applied Geochemistry*, 16, 659-718.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1975). *Guidelines for prediction of crop water requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 24. Rome, Italy.

Gómez, M.A. (1997). *Estudio hidrológico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: vertederos de Guipuzcoa y Navarra. El vertedero como sistema acuífero*. Tesis Doctoral, Univ. del País Vasco, 460 p.

Hargreaves, G.H. y Samani, Z.A. (1982). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108, 225-230.

Thornthwaite, C.W. (1948). *Geographical Review*, 38, 55-94.

Turc, L. (1961). *Annales Agronomique*, 12, 13-49.

Vadillo, I. (2003). *Contaminación de acuíferos carbonatados por vertederos de residuos sólidos urbanos: caso del vertedero de La Mina (Marbella, Málaga)*. Tesis Doctoral, Univ. de Malaga, 224 p.

Vadillo, I., Carrasco, F. y Andreo, B. (2004). *Geogaceta*, 36, 123-126.