
LOCALIZACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN LA COMUNA DE PARRAL, CHILE, A TRAVÉS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Carlos Mena Frau, Yohana Morales Hernández, Yony Ormazábal Rojas y John Gajardo Valenzuela

RESUMEN

Se compararon dos métodos de evaluación multicriterio (EMC), la sumatoria lineal ponderada y la sumatoria lineal ponderada ordenada, aplicadas en la evaluación de sitios idóneos para la localización óptima de un relleno sanitario en la comuna de Parral, Región del Maule, Chile. Se utilizaron un sistema de información geográfica (SIG) ráster y una base de datos cartográfica digital de

la comuna. La evaluación de los distintos criterios se realizó a través del método de las jerarquías analíticas (MJA), lo que permitió definir la importancia relativa de cada criterio dentro de la evaluación. Los resultados obtenidos muestran claras diferencias entre los modelos de acogida generados por cada uno de los métodos, representando distintos escenarios de decisión.

LOCALIZATION OF A LANDFILL SITE IN THE COMUNE OF PARRAL, CHILE, THROUGH MULTI-CRITERIA EVALUATION

Carlos Mena Frau, Yohana Morales Hernández, Yony Ormazábal Rojas and John Gajardo Valenzuela

SUMMARY

Two multi-criteria evaluation (MCE) techniques, weighted linear combination and ordered weighted average, were applied and compared in the evaluation of suitable sites for the location of a landfill in the Commune of Parral, Maule Region, Chile, using a raster GIS and a cartographic digital data base of the commune.

The evaluation of the different criteria was made by the analytical hierarchy process (AHP), which allows establishing the relative importance of each one within the evaluation. The results obtained show clear differences among the reception models generated by each of the methods, representing different decision scenarios.

Introducción

El incremento de la población y el consecuente crecimiento de las ciudades generan conflictos sociales, económicos y ambientales a las autoridades encargadas de la planificación del territorio. Uno de los conflictos más recurrentes detectados es la localización y asignación de diferentes instalaciones o equipamientos cuyo objetivo es cubrir las necesidades básicas de la población, como salud, educación, trabajo y seguridad. La localización en el territorio de instala-

ciones no deseadas (instalaciones donde predominan las externalidades negativas por sobre las positivas y la población presenta un rechazo a su construcción o habilitación, aún reconociendo su necesidad) es un problema de gran importancia y fuerte contenido geográfico, especialmente si se considera que en muchas comunas de Chile, como es el caso de Parral, se ha percibido una escasa planificación territorial en el análisis y localización de rellenos sanitarios para la disposición de los residuos sólidos domiciliarios. De acuerdo a Franco

y Franco (1998), desde un punto de vista espacial, el problema se puede esquematizar de la siguiente manera: las instalaciones donde se tratan y depositan los residuos constituyen hechos de tamaño puntual; los traslados de residuos entre los lugares de producción y tratamiento se realizan a través de la red vial existente; finalmente, la población, junto con otros elementos sensibles, se sitúa concentrada en muchos puntos del territorio, existiendo una distribución irregular. En este contexto, el problema geográfico se resume en contestar

la siguiente pregunta: ¿En qué punto o puntos se deben colocar las instalaciones para que atiendan de modo adecuado a la población y/o empresas encargadas de la gestión y recolección de residuos? (Bosque y Franco, 1995).

De esta forma, la ubicación de un relleno sanitario debe intentar conciliar dos objetivos en conflicto, la búsqueda de la mayor eficiencia espacial y el logro de la mayor equidad o justicia espacial en la distribución de las externalidades negativas. Bosque *et al.* (1999) consideran

PALABRAS CLAVE / Evaluación Multicriterio / Instalaciones No Deseadas / Sistemas de Información Geográfica / Sumatoria Lineal Ponderada /

Recibido: 28/01/2010. Modificado: 23/07/2010. Aceptado: 27/07/2010.

Carlos Antonio Mena Frau. Cartógrafo, Universidad de Chile. Doctor en Cartografía, Teledetección y SIG, Universidad de Alcalá, España. Director, del Centro de Geomática y Programa de Magíster en Gestión Ambiental Territorial, Universidad de Talca (UTALCA), Chile. Dirección: Centro

de Geomática, Av. Lircay s/n. Casilla 721, Talca, Chile. e-mail: cmena@utalca.cl.

Yohana Morales Hernández. Ingeniera Forestal y Magíster en Gestión Ambiental Territorial, UTALCA, Chile. Docente, UTALCA, Chile. e-mail: yomoraless@utalca.cl.

Yony Ormazábal Rojas. Ingeniero Forestal, UTALCA, Chile. Master en Ciencias de Geo-Información y Observación Terrestre, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Holanda. Docente, UTALCA, Chile. e-mail: yormazabal@utalca.cl.

John Gajardo Valenzuela. Ingeniero Forestal, UTALCA, Chile. Magíster en Sistemas de Información Geográfica y Tratamiento Digital de Imágenes, Universidad de Alcalá, España. Docente, UTALCA, Chile. e-mail: jgajardo@utalca.cl.

LOCALIZAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO NA COMUNA DE PARRAL, CHILE, ATRAVÉS DE AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO

Carlos Mena Frau, Yohana Morales Hernández, Yony Ormazábal Rojas e John Gajardo Valenzuela

RESUMO

Foram comparados dois métodos de avaliação multicritério (AMC), a somatória linear ponderada e a somatória linear ponderada ordenada, aplicadas na avaliação de locais idôneos para a localização ótima de um aterro sanitário na comuna de Parral, Região de Maule, Chile. Utilizaram-se um sistema de informação geográfica (SIG) raster e uma base de dados cartográfica digi-

tal da comuna. A avaliação dos distintos critérios foi realizada através do método das hierarquias analíticas (MHA), o que permitiu definir a importância relativa de cada critério dentro da avaliação. Os resultados obtidos mostram claras diferenças entre os modelos de acolhida gerados por cada um dos métodos, representando distintos cenários de decisão.

estos objetivos en conflicto como principios básicos para resolver de manera óptima los problemas de localización de instalaciones. Según Bosque (1992) la eficiencia espacial se refiere al volumen global de desplazamientos que el conjunto de la demanda debe efectuar para utilizar las instalaciones. Se buscan localizaciones que dada una posición concreta de la demanda, determinen un costo mínimo en la construcción y el uso cotidiano, considerando que la vida útil de un relleno sanitario es mayor a 5 años para poblaciones menores de 20.000 habitantes y para aquellas que superan esa cantidad debe ser mayor a 10 años (Allende, 2001). Un elemento esencial en este sentido es la minimización de los desplazamientos necesarios para que estas instalaciones sean utilizadas. Según Bosque y Franco (1995), otro elemento significativo de la eficiencia espacial es la disminución de las molestias potenciales que estas instalaciones ocasionan a la población residente en la zona. Por otra parte, la justicia o equidad espacial representa el grado de igualdad en la distribución de los servicios que presta cada instalación a la población (Bosque, 1992). La búsqueda de la equidad espacial en la localización de instalaciones no deseadas resulta un problema de difícil solución. Muchos investigadores han optado por el credo de "entre más lejos mejor", y de esta manera se busca que la localización sea lo más justa posible al afectar al menor número de habitantes (Franco y Franco, 1998). Para Gajardo (2001), la instalación más justa será aquella en la cual existan las menores diferencias entre los distintos sectores de la

población que se ven afectados por el emplazamiento de una instalación no deseada.

La solución de este tipo de problemas requiere de la conciliación de objetivos en conflicto, como son la maximización de la eficiencia y la disminución de externalidades negativas de la actividad. Es preciso entonces incluir en la evaluación a desarrollar una serie de criterios que pretendan dar con la solución óptima. Al considerar más de un criterio en la toma de decisiones es necesario recurrir a técnicas como la evaluación multicriterio (EMC) que permiten estudiar un número finito de criterios con múltiples alternativas, jerarquizándolas de acuerdo a su grado de conveniencia (Pullar, 1999; Flament, 1999; Gómez y Barredo, 2005).

La EMC basa su funcionamiento en la evaluación de una serie de alternativas sobre la base de una serie de criterios (Barredo, 1995), pudiendo expresarse de forma concisa a través de una matriz que recibe el nombre de evaluación, donde las filas representan los criterios (j) relevantes al problema y las columnas representan las alternativas (i) en competencia (Flament, 1999). Los valores internos de esta matriz son llamados puntuaciones de criterios (X_{ij}) y representan el valor o nivel de deseabilidad que ha obtenido cada alternativa en cada criterio. Además, en el caso que los criterios posean distinta relevancia frente a la evaluación a desarrollar, se debe asignar un valor específico a cada criterio de acuerdo a su importancia relativa. Este valor recibe el nombre de peso o ponderación (W_j) cuando se expresa cuanti-

tativamente y jerarquía cuando se realiza de modo cualitativo u ordinal (Barredo, 1996). Una vez asignados los pesos (W_j) a los criterios, éstos se incluyen en una nueva matriz llamada de prioridades.

Los valores obtenidos deben ser estandarizados a un intervalo común (0-100, o cualquier otro), con el fin de ser procesados por una regla de decisión, para formar un índice de evaluación. La EMC ofrece algunos procedimientos (reglas de decisión) para combinar información de varios criterios, como el método de sumatoria lineal ponderada (SLP) y el método de la sumatoria lineal ponderada ordenada (OWA, de *ordered weighted average*) (Mendes y Satoro, 2001).

Según Eastman (2001), la implementación de una EMC en el ámbito de los sistemas de información geográfica (SIG), debe considerar los siguientes componentes: a) Objetivos. Se puede considerar como una función a desarrollar y que sirve como base en la estructuración de las reglas de decisión. b) Criterios. Son la base para la decisión, la cual puede ser medida y evaluada; estos criterios en la EMC pueden ser de dos tipos, factores (criterios que realzan o detraen la conveniencia de una alternativa específica para la actividad bajo consideración), y restricciones (criterios que se utilizan para limitar algunas alternativas según la actividad evaluada). c) Regla de decisión. Corresponde al procedimiento por el cual los criterios se seleccionan, combinándose para llegar a una evaluación definitiva. d) Evaluación. Constituye el proceso de aplicar las reglas de decisión a los componentes antes mencionados.

Dentro de los métodos de EMC el más conocido y comúnmente utilizado según Flament (1999) es el método de la SLP, que consiste en la obtención de una puntuación global por simple suma de las puntuaciones obtenidas de cada criterio. Mendes y Satoro (2001) mencionan que el método de la SLP, dadas sus características, permite que los criterios compensen sus calidades, lo que implica que un criterio que posea una baja calidad (mal evaluada) pueda ser compensado por otros criterios de mayor calidad.

Por otra parte, el método de la OWA fue propuesto por Yager en 1988 y desde su introducción ha sido aplicado a muchos campos, tales como redes neuronales, sistemas de banco de datos, estudios con lógica borrosa y evaluaciones multicriterio (Marichal y Roubens, 1995). Este método de EMC, al igual que la SLP, requiere que los factores sean estandarizados en una escala continua de conveniencia y que, además, se conozca su importancia relativa dentro de la evaluación (Eastman, 2001). Sin embargo, en el caso del OWA se incluye un segundo conjunto de pesos, denominados pesos de orden, los cuales no son aplicados a ningún factor específico, sino aplicados a cada unidad básica de representación espacial en un modelo de datos raster (pixel) en forma independiente. Mendes y Satoro (2001) mencionan que OWA es capaz de ofrecer una gama de posibles soluciones, debido a que los pesos de orden pueden tener una combinación tan larga de valores, siempre y cuando su suma corresponda a 1.

Este tipo de problemas involucra el análisis y manejo de

gran cantidad de información, principalmente de tipo espacial, así como también de un considerable número de variables, requiriendo para su solución de tecnologías que permitan su sistematización. En este contexto, los SIG son capaces de almacenar y manejar este tipo de información, proporcionando modelos y suministrando informes e instrumentos para el análisis, diagnóstico y ordenación del territorio (Mena, 2005).

La integración de la EMC y los SIG genera una potente he-

ondulada, intensamente regada, con condiciones climáticas y de suelo que favorecen un intenso poblamiento y explotación agrícola, lo cual reduce la elección de sitios adecuados para albergar un relleno sanitario. Geográficamente se encuentra entre las coordenadas UTM 5.952.972-6.022.014N y 220.021-311.293E, ocupando una superficie de 1638,4km². De acuerdo al censo poblacional del año 2002, existe una población total de 37.822 habitantes, correspondientes a un 3,78% de la población total

de los elementos geográficos se realizó mediante SIG. Finalmente, las capas temáticas en formato de representación vectorial fueron rasterizadas para compatibilizar la información generada a escala 1:50000 con el programa IDRISI 32 empleado para la generación del modelo.

La definición de los criterios (factores y limitantes) utilizados en la evaluación de sitios potenciales se basó en consideraciones del tipo urbanísticas, económicas y ambientales susceptibles de ser representados espacialmente (Gómez y Barredo, 2005). De esta manera, los criterios utilizados fueron uso actual del suelo, permeabilidad del suelo, distancia a los caminos y vías de acceso (accesibilidad), distancia al centro productor (transporte), red hidrográfica, vegetación, áreas de conservación, áreas turísticas, pendiente del terreno, y orientación. Posteriormente, las diferentes alternativas de selección para cada criterio fueron definidas por medio de la reclasificación de las capas temáticas.

Para la habilitación de las restricciones se confeccionaron capas binarias que permitieran diferenciar áreas con aptitud para la actividad. Por lo tanto, al tratarse de información binaria el código 1 indica aquel lugar candidato para la actividad y el código 0 indica la anulación total de dicho sector para la actividad evaluada. De esta forma, se excluyeron todos aquellos sitios que se encontraran a menos de 1000m de un curso de agua, a menos de 600m de un centro poblado y a menos de 200m de cualquier camino transitable, sitios con suelos considerados altamente productivos (de clase I, II y III), y todos aquellos terrenos cuya vegetación este considerada por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) como sensible o protegida.

Evaluación multicriterio

El método de las jerarquías analíticas (MAJ) constituye un sistema de toma de decisiones ideado por Thomas L. Saaty, de la Universidad de Pensilvania (Mendoza *et al.*, 2001), que consiste en utilizar las capacidades o habilidades de las per-

sonas para usar la información y la experiencia para comparar entre pares de opciones y otorgarle a esta comparación una magnitud relativa. Este enfoque de comparación, ligado a un método de asignación de valores mediante una escala arbitraria, ha sido utilizado para descubrir la importancia relativa de los criterios de decisión en la EMC. Para la aplicación del MAJ se realizan las siguientes fases (Saaty, 1995, citado por Gómez y Barredo, 2005):

Descomposición. Se jerarquizan los elementos esenciales del problema, ubicando en la parte superior el objetivo global, el siguiente nivel lo ocupan los criterios relevantes para alcanzar el objetivo y en el nivel inferior se encuentran las alternativas a ser evaluadas (Figura 2).

Priorización y juicio comparativo. Se generan matrices de comparación entre pares de criterios y sus respectivas alternativas con el fin de comparar la importancia relativa de cada uno de ellos sobre los restantes (A_{ij}), para posteriormente determinar el *eigenvector* principal, el cual establece los pesos (W_{ij}), y el *eigenvalor* (c.r.), que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores. La escala utilizada en la comparación de criterios y alternativas, comprende un rango que oscila entre 1/9 (valor extremadamente menos importante) y 9 (valor extremadamente más importante), donde el 1 indica igual importancia entre los elementos. La asignación de los juicios de valor para este estudio fue realizada apoyándose en la opinión y entrevistas con expertos en el tema. El universo de profesionales consultados agrupó a la Universidad de Talca, el Gobierno Regional del Maule, la Municipalidad de Parral, la Corporación Nacional del Medio Ambiente, el Servicio de Salud del Maule, y empresas de servicios y consultores particulares.

Síntesis de prioridades. Se obtiene el peso de cada criterio (W_j), el que representará su orden de importancia dentro de la evaluación, así como el de sus

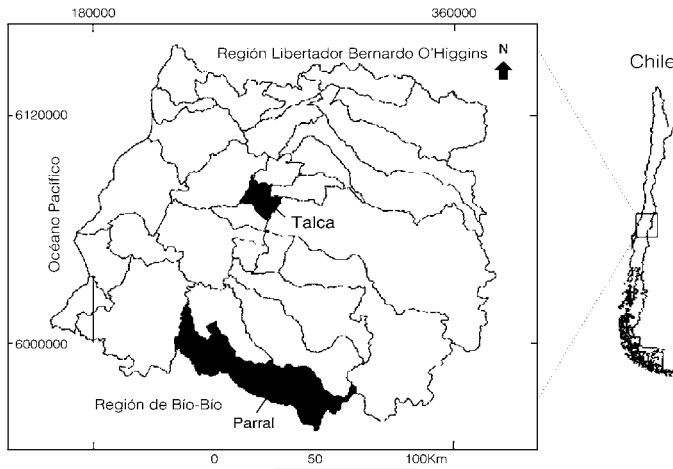


Figura 1. Área de estudio: Comuna de Parral, Región del Maule.

rramienta para asistir en procesos de análisis espacial a través del modelado, en especial para la asignación/localización de actividades, posibilitando dar soluciones a problemas que involucran interrogantes como dónde, a qué distancia, y cuánto (Barredo, 1996; Gómez y Barredo, 2005).

El presente estudio tiene como objetivo localizar sitios potencialmente adecuados para la ubicación de un relleno sanitario en la Comuna de Parral, Chile, utilizando SIG y los métodos de la SLP y OWA de EMC:

Métodos

Descripción de la zona de estudio

El estudio se realizó en la comuna de Parral ubicada en la provincia de Linares, Región del Maule, Chile (Figura 1). La comuna está localizada en la depresión intermedia (Santibáñez y Uribe, 1993), que corresponde a una planicie suavemente

de la región y una densidad de 23,08 hab/km². Del total de la población, 30,21% es población rural y un 69,79% es población urbana (INE, 2002). Dadas las características climáticas, la comuna presenta temperaturas que oscilan entre los 7°C en invierno y 31°C en la época estival, y las precipitaciones alcanzan en un año normal los 750mm (Santibáñez y Uribe, 1993). Las clases de suelos predominantes de acuerdo a la clasificación realizada por CIREN-CORFO (1983) son III (huertos frutales y otros cultivos permanentes) y IV (terrenos con cultivos extensivos).

Creación de la base de datos

La creación de la base de datos comprendió la recopilación de antecedentes de la zona de estudio. Para ello se dispuso de cartas topográficas (1:50000), mosaicos y ortofotos (1:20000) adquiridos el año 2001 y planos topográficos de la comuna. La asignación de atributos temáticos

respectivas alternativas de selección (W_{ij}).

Se estableció una escala común de medida entre los pesos de las alternativas con el fin de incluirlos en los procedimientos de EMC presentes en el SIG. Para esto, se realizó una normalización de los pesos, siendo los valores convertidos a números enteros mediante la siguiente fórmula (Gómez y Barredo, 2005):

$$X_{ij} = \frac{W_{ij} - W_{ij \text{ min}}}{W_{ij \text{ max}} - W_{ij \text{ min}}} \times 100$$

donde X_{ij} : valor normalizado de la alternativa i en el criterio j ($X_{ij} = 0$ representa la menor aptitud del terreno para albergar cierta actividad y $X_{ij} = 100$ representa la mayor aptitud del terreno para albergar cierta actividad), W_{ij} : valor (peso) de la alternativa i en el criterio j , min y max : valores mínimos y máximos de las alternativas en el criterio.

Aplicación de los métodos de EMC en el programa IDRISI

En el presente estudio se utilizaron dos métodos de EMC para evaluar la localización/instalación de un relleno sanitario en la comuna de Parral. Éstos corresponden al método de la sumatoria lineal ponderada (SLP) y al método de sumatoria lineal ponderada ordenada (OWA), que se encuentran disponibles en el programa IDRISI 32.

El Método SLP, representado por la ecuación $r_i = \sum W_j \times X_{ij}$, fue aplicado al conjunto de factores incluidos en la evaluación. De esta manera se obtuvo una cobertura ráster donde cada píxel representa la capacidad de acogida (r_i), cuyos valores oscilaron entre 0 y 100, los más altos corresponden a zonas más idóneas para la acogida de un relleno sanitario. Para obtener el modelo final de capacidad de acogida fue necesario excluir aquellos sectores cubiertos por las variables que se consideraron limitantes en el desarrollo de la actividad evaluada, conforme a

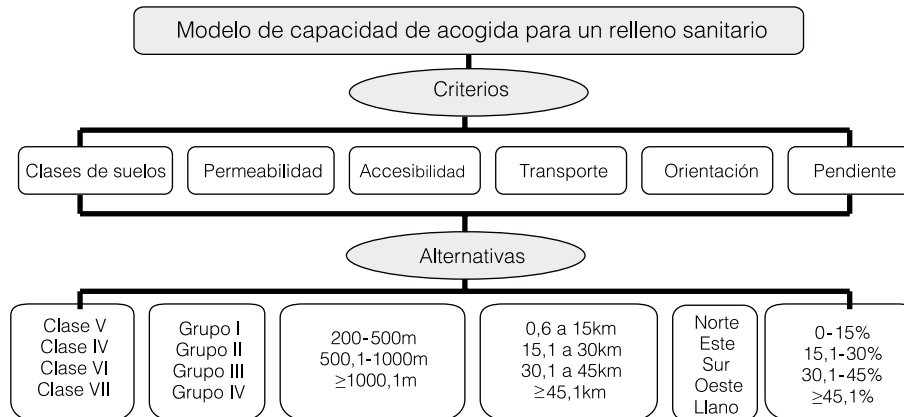


Figura 2. Descomposición del modelo de capacidad de acogida.

lo señalado en la etapa de habilitación de los criterios limitantes.

El método OWA incluye dos conjuntos o vectores de pesos; los pesos del factor (W_j , $j = 1, 2, \dots, n$) y los pesos de orden (V_j , $j = 1, 2, \dots, n$), donde estos últimos controlan el nivel de riesgo e intercambio en la evaluación (Malczewski, 2004). Los pesos de orden no son aplicados a ningún factor en particular, sino que son aplicados a cada píxel en forma independiente y según una clasificación en donde se ordena de menor a mayor los criterios, según los resultados obtenidos al ponderar la alternativa del criterio (X_{ij}) por el peso del factor. Posteriormente, el primer peso de orden es asignado al valor más bajo del píxel, el segundo peso de orden se le asigna al valor ubicado en segunda posición, y así sucesivamente. De esta manera se puede apreciar que los pesos de orden no se asocian con un criterio en particular (como en el caso de los pesos del factor, W_j) sino que se asocian a la posición que logre la alternativa del criterio (X_{ij}) en el ranking. Es decir, dado un set de alternativas ponderadas ($W_1 X_{i1}, W_2 X_{i2}, \dots, W_n X_{in}$) y un set de pesos de orden ($V_1, V_2, \dots, V_n, 0 = V_j = 1, \sum(V_j) = 1$), la sumatoria lineal ponderada ordenada se puede definir como $OWA = \sum(V_j b_{ij})$, donde $b_{i1} \geq b_{i2} \geq \dots \geq b_{in}$ es la secuencia obtenida al ordenar los valores de las alternativas ponderadas, $W_1 X_{i1}, W_2 X_{i2}, \dots, W_n X_{in}$ (Yager, 1988; Rinner y Malczewski, 2002).

Se obtuvieron dos modelos de acogida al aplicar este método,

correspondientes a dos conjuntos de pesos de órdenes diferentes, con el fin de ser comparados entre ellos y, a su vez, con el modelo de acogida obtenido al aplicar el método SLP.

Debido a que se consideraron seis factores en la evaluación (usos del suelo, permeabilidad, accesibilidad, transporte, orientación, y pendiente) fue necesario definir seis pesos de orden para cada uno de los modelos. Para la asignación de los pesos de orden se crearon dos modelos, uno que permitió obtener una evaluación adversa al riesgo (visión pesimista) y un segundo modelo donde se manifestó una adhesión al riesgo (visión optimista). El nivel de intercambio está dado por la distribución de los pesos; por ejemplo, si todos los pesos de orden se reparten en forma homogénea (todos poseen igual valor), corresponde a una regla de decisión donde el intercambio es completo (resultado igual que la SLP) y existe indiferencia al riesgo. Por otro lado, si los pesos de orden se distribuyen de tal forma que el valor total (1) se ubica en los extremos de la regla de decisión, no existe intercambio alguno y dependiendo del extremo en que se acumule, se tratará de una regla de decisión completamente arriesgada. En cuanto a la distribución de los pesos, ésta fue de menor a mayor para el modelo optimista y de mayor a menor para el modelo pesimista. Los pesos considerados para los modelos se encuentran en la Tabla I.

Una vez definidos los pesos de orden a utilizar se aplicó el método OWA. Para ello fueron

ingresados al programa IDRISI 32 los distintos factores considerados en la evaluación y sus correspondientes pesos, las capas que representan las limitantes y los pesos de orden.

Asignación de categorías de capacidad de acogida

Los modelos de capacidad de acogida obtenidos por los métodos de EMC corresponden a coberturas donde los

pixeles se encuentran codificados con valores que van desde 0, que representa la menor aptitud del terreno para albergar un relleno sanitario, hasta 100, que representa la mayor aptitud. Con el fin de ordenar y comprender de mejor forma los resultados obtenidos, los pixeles se agruparon en polígonos de capacidad, de acuerdo a ciertos rangos de aptitud (Tabla II).

Comparación de métodos SLP y OWA y sus resultados

La comparación para el caso de los métodos (SLP y OWA), en cuanto a su ejecución, se realizó en forma cualitativa, analizando las ventajas y desventajas que presenta cada uno de ellos. Respecto a los resultados, la comparación se realizó en forma cuantitativa. En este caso, una primera aproximación de comparación es a través del análisis visual de las capas de capacidad de acogida.

Con el objeto de conocer si existió diferencia o concordancia en los resultados obtenidos utilizando ambos métodos, se consideró la metodología utilizada por Barredo y Bosque (1998), donde a través de la utilización de una tabla de contingencia fueron analizados los resultados obtenidos por dos métodos de EMC como son la SLP y el método de la precedencia. Se obtuvo una matriz de la tabla de contingencia, consistente en una tabla de doble entrada con las categorías de dos mapas, donde en cada cruce se determinó el número de pixeles que cumplían dicha situación. Por otro lado,

TABLA I
PESOS DE ORDEN PARA CADA MODELO

Modelo A (optimista)	0,05	0,11	0,15	0,19	0,23	0,27
Modelo B (pesimista)	0,27	0,23	0,19	0,15	0,11	0,05

un segundo resultado corresponde a un nuevo mapa donde los valores temáticos asignados a cada pixel resultan de las diferentes combinaciones posibles entre las categorías de los mapas iniciales (Bosque *et al.*, 1999). Para el caso de este trabajo solo es relevante el análisis de tabla obtenido en este procedimiento.

Como se mencionó anteriormente, para el método OWA se obtuvieron dos resultados distintos, uno correspondiente al modelo pesimista y el otro, al modelo optimista. Los resultados de cada uno de ellos fueron comparados con los obtenidos al aplicar el método SLP.

Con el fin de reconocer, describir y verificar la factibilidad de los sitios considerados potenciales para albergar un relleno sanitario se identificaron y seleccionaron en cada modelo de capacidad de acogida todos los polígonos clasificados en la categoría Muy Alta y/o Alta. Se realizaron salidas a terreno con apoyo de un navegador (GPS), llegando en forma exacta a los sectores preestablecidos.

Resultados y Discusión

Aplicación de métodos de EMC (reglas de decisión)

Una vez aplicados los métodos de evaluación multicriterio (SLP y OWA) fue posible obtener tres capas distintas que representan el modelo de capacidad de acogida correspondiente a las tres reglas de decisión consideradas en este estudio.

En la Tabla III, la mayor superficie corresponde a la categoría Media donde el intervalo va de 40 a 60 puntos, alcanzando las 9.098,4ha (5,53% de la superficie total de la comuna). El predominio de esta categoría se atribuye a las cualidades de la SLP, donde hay un intercambio completo entre los factores, es decir, los valores más bajos son compensados por los más altos, tendiendo la puntuación final al promedio. En este sentido,

los factores más relevantes para la instalación de un relleno sanitario fueron la accesibilidad y transporte, seguidos por la permeabilidad, usos del suelo, pendiente y orientación.

En el modelo A (optimista), obtenido por el método OWA, las categorías Muy Alta y Alta poseen las mayores superficies alcanzando el 8,65% de la superficie total de la comuna. Se observa la ausencia de pixeles considerados con capacidad de acogida Muy Baja. En el modelo B (pesimista) del método OWA, la mayor superficie la alcanzó la categoría Baja con un total de 8.780,64ha que corresponden al 5,34% de la comuna. La diferencia existente entre los modelos del método OWA se debe principalmente a la distribución de los pesos de orden. En el modelo A se obtuvo un mayor número de hectáreas consideradas como Alta y Muy Alta, debido que este modelo considera un cierto nivel de riesgo permitiendo que los criterios (factores) mejor evaluados sean ponderados con los pesos de orden más altos. Por otra parte, en el modelo B, donde no se asume riesgo, los pixeles tienden a asumir un valor final de acogida más bajo, ya que los criterios peor evaluados tienen los pesos de orden más altos.

Como se observa, el método OWA consiste en utilizar, además de los pesos de los factores, otra serie de pesos "ordenados" que controlan cómo se agregan esos factores ponderados. De esta manera es posible determinar el nivel total de compensación

TABLA II
CATEGORÍAS DE CAPACIDAD DE ACOGIDA

Categoría	Puntaje	Aptitud
1	80-100	Muy alta
2	60-80	Alta
3	40-60	Media
4	20-40	Baja
5	1-20	Muy baja
6	0	Excluyente

permitido entre los factores empleados (Gómez y Bosque, 2005). Así, el método permitiría agregaciones borrosas y continuas entre la intersección (método de riesgo mínimo) y la unión (método de riesgo máximo), ocupando la sumatoria lineal ponderada la situación intermedia (Tabla III).

Tabla de contingencia y comparación de métodos

En la Tabla IV se representa el cruce entre las coberturas obtenida por el método SLP y el modelo A de OWA. Se observa que la superficie correspondiente a la categoría Muy Alta (80-100) en la SLP es de 3.880,08ha, que en su totalidad pasan a formar parte de la categoría Muy Alta del modelo A de OWA, el que además se ve incrementado por 563,32ha, correspondientes a la categoría Alta (60-80) y 1.301,4 de la categoría Media (40-60) de la SLP, alcanzando un total de 5.744,8ha. El mayor cambio se aprecia en la categoría Media, ya que del total de 9.098,4ha obtenidas en el método SLP, solo 69,52 de éstas continúan en la misma categoría en la capa del modelo A de OWA, y el resto pasa a formar parte de la categoría Muy Alta y Alta en mayor proporción.

Para el caso de la tabla de contingencia entre SLP y el mo-

delo B del método OWA (Tabla V), es posible observar que todas las categorías de SLP pasan a conformar parte de categorías más bajas en el modelo B de OWA, por ejemplo, la categoría Media en la SLP posee un total de 9.098,4ha, de las cuales 8.648,92 (~95%) fueron consideradas en el intervalo de Baja (20-40)

en el modelo B de OWA.

Es preciso señalar que los métodos de EMC se diferencian básicamente en los procedimientos aritmético-estadísticos que se realizan sobre las matrices de evaluación y de prioridades, con lo cual se obtiene una evaluación final de las alternativas. Sin embargo, en cuanto a la aplicación de los métodos utilizados en este estudio se puede indicar que ambos presentan la misma dificultad en su implementación; es decir, la base de datos necesaria para su ejecución en el programa IDRISI 32 es la misma. Ambos métodos requieren previamente de la definición de los componentes de la EMC (criterio: factores y restricciones, alternativas de evaluación), la valorización de las alternativas por parte de un centro decisor (expertos) y su previa evaluación, la obtención de los pesos de los factores y, para el caso del método OWA, la inclusión de los pesos de orden. Es en esta fase donde OWA presenta algunas complicaciones, ya que en la definición de los pesos de orden es necesario comprender los conceptos de riesgo e intercambio y cómo estos influyen en el resultado final, lo que se ve dificultado por la falta de bibliografía al respecto, pudiendo considerarse como una desventaja del método al momento de su elección

TABLA III
MODELOS DE CAPACIDAD DE ACOGIDA

Capacidad de acogida	SLP		OWA modelo A		OWA modelo B	
	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Muy Alta	3.880,08	2,36	5.744,80	3,49	58,96	0,03
Alta	1.307,12	0,79	8.483,12	5,16	4.014,64	2,44
Media	9.098,40	5,53	370,72	0,22	1.562,48	0,95
Baja	326,32	0,2	13,28	0,01	8.780,64	5,34
Muy Baja	0	0	0	0	195,2	0,12
Excluyente	149.906,44	91,12	149.906,44	91,12	149.906,44	91,12

TABLA IV
TABULACIÓN CRUZADA ENTRE SLP Y OWA (MODELO A)

		Sumatoria lineal ponderada				
		1	2	3	4	Total
OWA modelo A	1	3.880,08	563,32	1.301,4	0	5.744,8
	2	0	743,8	7.727,48	11,84	8.483,12
	3	0	0	69,52	301,2	370,72
	4	0	0	0	13,28	13,28
	Total	3.880,08	1.307,12	9.098,4	326,32	14.611,92

TABLA V
TABULACIÓN CRUZADA SLP Y OWA (MODELO B)

		Sumatoria lineal ponderada				
		1	2	3	4	Total
OWA modelo B	1	58,96	0	0	0	58,96
	2	3.821,12	193,52	0	0	4.014,64
	3	0	1.113	449,48	0	1.562,48
	4	0	0,6	8.648,92	131,12	8.780,64
	5	0	0	0	195,20	195,20
	Total	3.880,08	1.307,12	9.098,4	326,32	14.611,92

para la realización de una cierta evaluación. No obstante, con los conocimientos necesarios, es posible señalar que el método OWA presenta ventajas comparativas con respecto al método de la SLP, al permitir controlar el nivel de riesgo e intercambio en la evaluación y poder obtener con él múltiples soluciones.

Al analizar los sitios potenciales para el albergue de un relleno sanitario obtenidos por las distintas reglas de decisión, es posible observar que todos presentan similares características en cuanto a los cultivos, topografía (pendiente), condiciones de acceso y que además existe una baja densidad poblacional.

Conclusiones

La integración de los SIG y EMC constituye una herramienta útil en la ordenación territorial, ya que en conjunto permiten la obtención de modelos y escenarios futuros, útiles para apoyar las labores de toma de decisiones por parte de los planificadores.

En el caso puntual de problemas de localización/asignación de un relleno sanitario, la utilización de los SIG y EMC permiten agilizar el proceso de selección de zonas aptas para dicho equipamiento, al acotar las áreas de selección, considerando un número importante de criterios y restricciones.

La calidad del estudio que se desarrolle utilizando SIG y EMC, se sustenta en dos pilares fundamentales. Por una parte, la riqueza de la información o base de datos, la capacidad de análisis y conocimientos del operador del SIG, y por otra, la calidad y consistencia de la evaluación realizada por los expertos. Dicha evaluación debe ser realizada por un centro decisor consensuado, que permita la discusión sobre los criterios y la importancia de éstos en la evaluación.

En cuanto a la modelación del problema de localización/asignación, los criterios considerados (factores y limitantes) se ven restringidos por la disponibilidad de información y por la factibilidad de ser representados espacialmente.

Al comparar los métodos de EMC se aprecia que la gran ventaja presentada por OWA respecto al método de la SLP es la posibilidad dada al centro decisor de controlar los niveles de intercambio y riesgo en la evaluación, posibilitando la simulación de distintos escenarios. De esta manera, el centro decisor define la regla de decisión según sus requerimientos, considerando la evaluación realizada por los expertos. Sin embargo, dicha ventaja presentada por OWA puede ser considerada limitante si el centro decisor no posee los conocimientos necesarios con

respecto al funcionamiento de OWA y a los conceptos de intercambio y riesgo, resultando en estos casos más oportuno utilizar el método SLP.

Al comparar los dos modelos (A y B) generados con el método OWA, es posible apreciar que al disminuir los niveles de riesgo, disminuye considerablemente la superficie evaluada como Muy Alta en cuanto a su capacidad de acogida de un relleno sanitario, acotando de esta manera las alternativas de selección. No obstante, es posible ver aumentada la precisión de la evaluación, al asegurar que las zonas evaluadas como Muy Altas poseen las mejores condiciones posibles en cada uno de los factores evaluados.

REFERENCIAS

- Allende T (2001) Evaluación Geológica-Ambiental en la determinación de la factibilidad de un área para relleno sanitario. *Rev. Inst. Inv. Fac. Minas Metal Cienc. Geogr.* 4: 52-62.
- Barredo J (1995) *Aplicación de Técnicas de Análisis Espacial Integrando Evaluación Multi-Criterio y Sistemas de Información Geográfica para la Realización de Estudios de Localización/Asignación de Actividades*. Tesis. Universidad de Alcalá, España. 355 pp.
- Barredo J (1996) *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Ra-Ma. Madrid, España. 236 pp.
- Barredo J, Bosque J (1998) Multicriterio evaluation methods for ordinal data in a GIS environment. *Geogr. Syst.* 5: 313-327.
- Bosque J (1992) *Sistemas de Información Geográfica*. Rialp. Madrid, España. 451 pp.
- Bosque J, Franco M (1995) Modelos de localización-asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables. *Serie Geográfica N°5*. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. España. pp. 97-112.
- Bosque J, Gómez M, Rodríguez V, Díaz M, Rodríguez A, Vela A (1999) Localización de centros de tratamientos de residuos: Una propuesta metodológica basada en un SIG. *Anales Geogr. Univ. Complut.* 19: 295-323.
- CIREN-CORFO (1983) *Materiales y Símbolos Utilizados por el Proyecto Aerofotogramétrico*. 3ª ed. Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales. Santiago, Chile. www.ciren.cl/datos/archivo/pdf/suelos/PI00172.pdf (Cons. 07/201010).
- Eastman J (2001) *Tutorial IDRISI 32*. Clark University. Worcester, MA, EEUU. 238 pp.
- Flament M (1999) *Glosario Multicriterio*. www.unesco.org/uy/red-m/glosariom.htm (Cons. 04/2009).
- Franco S, Franco R (1998) *Aplicación de los SIG para la Localización Asignación de Instalaciones no Deseables*. <http://selper.uabc.mx/Publicacio/Cong9/te15.doc> (Cons. 04/2009).
- Gajardo J (2001) *Localización de Sitios Adecuados para Albergar un Vertedero Utilizando Sistemas de Información Geográfica y Técnicas de Evaluación Multicriterio*. Tesis. Universidad de Talca. Chile. 112 pp.
- Gómez M, Barredo J (2005) *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Ra-Ma. Madrid, España. 279 pp.
- INE (2002) *Censo de Población y Vivienda*. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile. www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_poblacion_vivienda/censo2002/mapa_interactivo/mapa_interactivo.htm (Cons. 07/2010).
- Malczewski J (2004) GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progr. Plann.* 62: 3-65.
- Marichal J, Roubens M (1995) Characterization of the ordered weighted averaging operators. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 3: 236-240.
- Mena C (2005) *Geomática para la Ordenación del Territorio*. Universidad de Talca. Chile. 314 pp.
- Mendes J, Satoro W (2001) Urban Quality of life evaluation scenarios: The case of Sao Carlos in Brazil. *CTBUH Rev.* 1: 13-23.
- Mendoza M, López E, Bocco G (2001) *Regionalización Ecológica, Conservación de Recursos Naturales y Ordenamiento Territorial en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán*. Programa SIMORELOS-CONACYT (Proyecto 98306024). Universidad Nacional Autónoma de México. 263 pp.
- Pullar D (1999) Using an allocation model in multiple criteria evaluation. *J. Geogr. Inf. Decis. Anal.* 3: 9-17.
- Rinner C, Malczewski J (2002) Web-enabled spatial decision analysis using ordered weighted averaging (OWA). *J. Geogr. Syst.* 4: 385-403.
- Santibáñez F, Uribe J (1993) *Atlas Agroclimático de Chile, Regiones VI, VII, VIII, y IX*. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 99 pp.
- Yager R (1988) On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Trans. Syst. Man Cyber.* 18:183-190.