

Cadiach, O., Pérez, Y. y Passuello, A. (2010): Propuesta de un modelo de idoneidad para la gestión de lodos procedentes de la depuración de aguas residuales. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 402-412. ISBN: 978-84-472-1294-1

PROPUESTA DE UN MODELO DE IDONEIDAD PARA LA GESTIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Cadiach, Oda^{1,2}; Pérez, Yolanda¹ y Passuello, Ana²

(1) Departament de Geografia, Universitat Rovira i Virgili, Av. Catalunya 35, 43002 Tarragona. E-mail: oda.cadiach@urv.cat

(2) Departament d'Enginyeria Química, Universitat Rovira i Virgili, Av. Països Catalans 26, 43007 Tarragona.

RESUMEN

El crecimiento de la población y de la industria ha implicado un aumento de los residuos, entre ellos los lodos procedentes de la depuración de las aguas residuales. Nace así la necesidad de generar modelos que gestionen este tipo de residuos, apostando principalmente por una gestión sostenible que se comprometa a su revalorización.

La presente comunicación muestra la propuesta de un modelo de idoneidad para la gestión de lodos en su principal aprovechamiento, como fertilizante agrícola. Para ello se ha desarrollado un prototipo que combina criterios medioambientales, sociales y económicos para la determinación de las áreas más adecuadas a la aplicación de los lodos. Las técnicas de evaluación multicriterio (EMC) y la elaboración de un Índice de Calidad (IC) se han entrelazado mediante un SIG, lo que ha permitido la representación espacial de las áreas agrícolas más idóneas, para el caso de estudio de Cataluña.

Palabras clave: Índice de Calidad, EMC, LSP, lodos de depuradora.

ABSTRACT

Population growth and industrial development has led to an increased production of residues; such as the sewage sludge from waste water treatment. This fact leads to the necessity of generating models to manage this waste. Through a sustainable management strategies.

The present communication shows a suitability model to manage sewage sludge in his principal disposal option, as agricultural fertilizer. For that, a model that combines environmental, social and economic criteria to determine the most suitability area for the sewage sludge application is developed. The Multi-criteria Decision Analysis techniques (MCDA) for the elaboration of a Quality Index (QI) have been integrated in the GIS platform, that which allowed the spatial representation of the best suitability agricultural areas in Catalonia.

Key words: Quality Index, MCDA, LSP, sewage sludge.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Para el buen desarrollo de las actividades económicas e industriales así como para mantener las necesidades de una población creciente, cualquier estado debe satisfacer una serie de servicios básicos, entre los que se encuentran la red de distribución de energía eléctrica y de gas, sistema de abastecimiento de agua potable, sistema de alumbrado público o sistemas de vías de comunicación entre otros. Pero todas estas actividades y densidad de población generan una gran cantidad de residuos que transfieren problemas de gestión y eliminación de los mismos.

Según la Directiva Europea relativa a los Residuos (2006/12/CE) todo Estado debe gestionar y eliminar los residuos así como también valorizarlos mediante el reciclado, nuevo uso, recuperación o cualquier otra acción destinada a obtener materias primas secundarias, o su utilización como fuente de energía. Para ello existen servicios de recolección de residuos sólidos o el sistema de alcantarillado de aguas residuales. En este último caso, la gestión y tratamiento de las aguas residuales, entendiéndose por aguas residuales todas aquellas derivadas del uso agrario, urbano e industrial, generan como residuo los lodos de depuración.

La población de la comunidad autónoma de Cataluña en el año 2009 es de 7,4 millones de habitantes (IDESCAT, 2010). En los últimos diez años se ha visto incrementada en un 20%, acompañada también por un aumento importante de los niveles de industrialización y por consiguiente de la generación de residuos. Según datos de la ACA (Agència Catalana de l'Aigua) la producción de lodos deshidratados se ha incrementado un 30% entre 2005 y 2007, bajando un 4% en el año 2008, lo que corresponde a una cantidad de unas 460.000 toneladas de materia fresca de lodo (tMF). Mientras que la producción de materia seca se ha mantenido más estable, alrededor de las 135.000 toneladas de materia seca (tMS) para el período 2005 - 2008. Los principales destinos para su valorización son, en primer lugar, la aplicación del residuo en suelos como fertilizante (tanto en agricultura como en jardines), en segundo lugar en cementeras como aporte energético, o en su defecto se depositan en vertederos controlados.

La gran cantidad de residuo generado implica una problemática de gestión y la necesidad de aplicar un control de los posibles elementos contaminantes que pueden contener. Para ello la Unión Europea elaboró la Directiva 86/278/EEC que determina las directrices que deben adoptar los países miembros para la utilización de los lodos en la agricultura principalmente. También regula varios aspectos de su uso para prevenir los efectos que puedan tener sobre el suelo y los seres vivos. A partir de ahí el estado español elaboró el Real Decreto 1310/1990, donde publican las principales restricciones de su uso en la agricultura y los valores límite en cuanto a las cantidades de metales, tanto de los lodos como de los suelos que pueden recibir este fertilizante.

Ante esta problemática surge la necesidad de crear un modelo que gestione los lodos de depuradora y su aplicación en los campos agrícolas que deben cumplir los requisitos determinados por el RD 1310/1990. La finalidad de este trabajo es generar una propuesta de modelo de gestión de lodos procedentes de la depuración de aguas residuales que incorpore tanto criterios de idoneidad medioambiental y social como los costes económicos derivados de su implementación. Cabe destacar que el objetivo principal se centra en la determinación del criterio económico y su conjunción con los criterios sociales y medioambientales. Para ello se ha desarrollado un modelo en un SIG, basado en metodología de evaluación multicriterio (EMC) en el que se ha introducido el criterio económico a partir de la elaboración de un indicador integrado de idoneidad y viabilidad económica, denominado Índice de Calidad (IC).

AREA DE ESTUDIO

El modelo planteado se centra en la comunidad autónoma de Cataluña, área en la que se ha aplicado el modelo de idoneidad. En cuanto a la propuesta de modelo económico y el IC se ha realizado para el área metropolitana de Barcelona, debido a que éstos se encuentran diseñados para una localización concreta, eligiendo así la zona del conjunto del territorio analizado que genera la mayor producción de lodos.

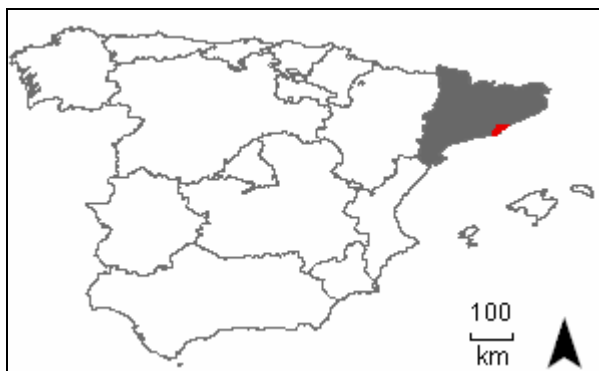


Figura 2. Mapa de localización del ámbito de estudio.

La Figura 1 expone el ámbito de estudio donde se han evaluado los suelos agrícolas, que constituyen 1 millón de hectáreas. Además muestra el emplazamiento del área metropolitana de Barcelona utilizada en el cálculo del criterio económico, ésta tiene una producción de unas 135.000 tMS al año, de las cuales 100.000 tMS provienen de ese mismo territorio.

METODOLOGÍA

La elaboración del modelo pretende incorporar criterios sociales, medioambientales y económicos. Para llevar a cabo este objetivo se ejecutan tres pasos o etapas metodológicas, el primero consiste en la determinación del modelo de idoneidad para la aplicación de los lodos en áreas agrícolas, el cual introduce los criterios sociales y medioambientales. En un segundo lugar se elabora el modelo económico que reúne los costes de transporte y de aplicación del lodo y, en tercer y último lugar, se juntan ambos modelos aplicando el IC.

Modelo de idoneidad

El desarrollo del modelo de idoneidad se ha basado en la utilización de metodología EMC. Esta consiste en ponderar distintas alternativas que se encuentran influenciadas por múltiples objetivos y criterios en conflicto (Voogd, 1983). Se han seleccionado una serie de criterios llamados limitantes, que son los que determinarán las alternativas, que en nuestro caso de estudio serán los campos agrícolas donde se pueden aplicar lodos. Seguidamente se han seleccionado una multiplicidad de factores relacionados con aspectos medioambientales y sociales que permitirán evaluar la idoneidad de cada una de ellas. La Figura 2 muestra la jerarquización de los factores para determinar la idoneidad de los campos agrícolas. Cada uno de los recuadros de color azul son los factores o datos de entrada del modelo que están representados por mapas del área de estudio, estos han pasado por tratamientos de homogeneización y normalización para determinar una misma región y escalas de trabajo comparables entre ellos. En el proceso de normalización se han valorado cada uno de los factores en un rango de 0 a 1, donde 0 se considera el valor menos idóneo y 1 denota el máximo nivel de idoneidad.

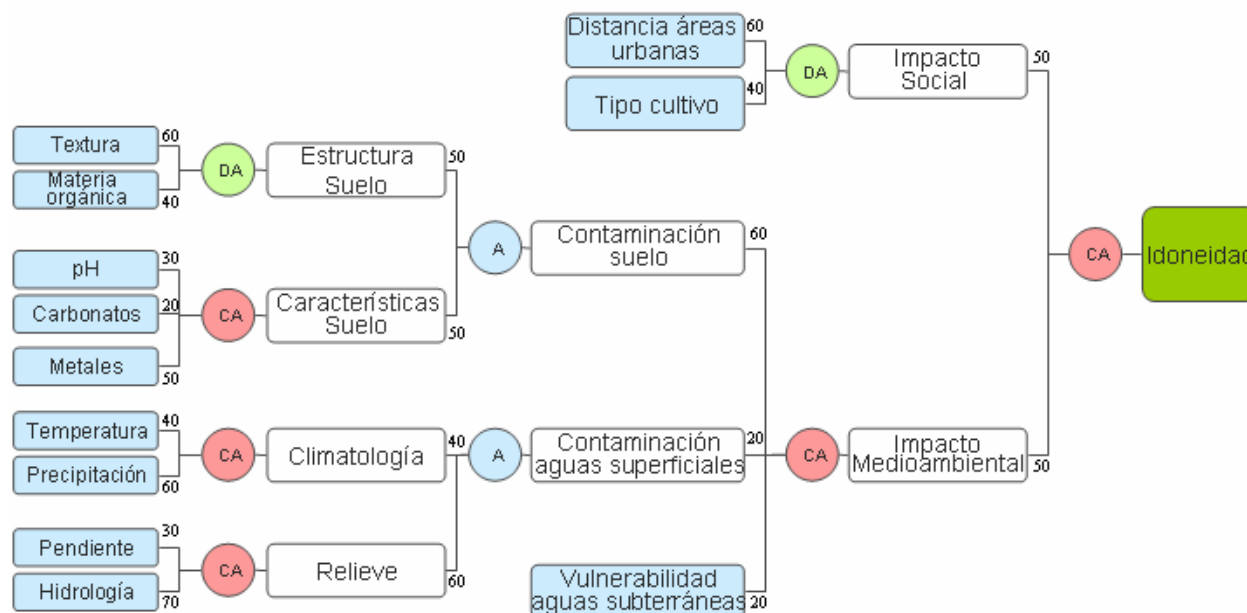


Figura 2. Esquema de agregación del modelo de idoneidad.

La técnica EMC utilizada es la Puntuación Lógica de Preferencias (Logic Scoring of Preferences, LSP) de Dujmović (2007). Esta técnica construye un modelo matemático que calcula el grado de idoneidad en cada píxel del área de estudio, mediante la aplicación de una función lógica que permite la combinación de los criterios. La Figura 2 expone los pesos de cada factor y las reglas de decisión o agregadores, que son las funciones lógicas introducidas

para la unión de los criterios. Para más información sobre el modelo de idoneidad se puede consultar Passuello et al. (2010).

Modelo económico

Una vez determinada la idoneidad de los suelos agrícolas para la incorporación de lodos, se continúa con el siguiente paso, la introducción de los factores económicos, entendiéndolos como aquellos costes que se derivan de la aplicación del lodo en el área de estudio. Distinguiremos entre dos costes: el coste de aplicación y el coste de transporte, que es aquél derivado del recorrido que realiza el lodo de la depuradora hasta el campo agrícola.

El **coste de aplicación** se obtiene en función del tipo de cultivo. Para ello se ha utilizado el mapa de tipo de cultivo que clasifica los campos agrícolas en cereal, fruta, huerta y pasto. Se han elegido los tipos de cereal y fruta, ya que la legislación es más exigente en los tipos de huerta y pastos; además los cultivos de cereal y fruta representan una mayor proporción del área agrícola de la zona de estudio. Los costes de aplicación se han calculado basados en la dosis de nitrógeno necesaria para cada tipo de cultivo y la concentración media de nitrógeno en las muestras de lodo de la zona de estudio. Se entiende como dosis la cantidad de lodo que puede aplicarse en un cultivo, el cual deriva de las proporciones máximas de nitrógeno (N) que puede recibir un cultivo (kgN/ha por año), determinado en la resolución AAR/1779/2009 por las normas técnicas de producción que establece el Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural.

Los **costes de transporte** son calculados teniendo en cuenta la distancia y el precio de transporte indicado por el gestor de lodos de depuradora. Para las distancias se han ejecutado tres búferes (a 50, 100 y 160 km) tomando como centro la ciudad de Barcelona. Ambos mapas, el de costes de aplicación y el de costes de transporte, se unen conformando el **mapa económico** para el área metropolitana de Barcelona.

Cálculo del Índice de Calidad (IC)

El último paso consiste en el cálculo del IC que evalúa el territorio en función de unos criterios sociales, medioambientales y económicos. La fórmula, planteada por Dujmović (2007) es la que se ha aplicado para calcular el IC, donde I es el resultado de idoneidad del píxel, I_{\max} es el valor máximo de idoneidad para la región estudiada; E corresponde a los costes que tiene el píxel y E_{\min} es el valor del coste mínimo que hay en la región. W representan los pesos que se aplicaran para el mapa de idoneidad (W_I) y el mapa económico (W_E) la suma de los cuales es 1.

$$IC = \left(\frac{I}{I_{\max}} \right)^{W_I} \left(\frac{E_{\min}}{E} \right)^{W_E}$$

Esta fórmula es una media geométrica que refleja el requerimiento simultáneo de un nivel de idoneidad altos y unos costes bajos, dando como resultado final un mapa ponderado de 0 a 1 que evalúa la idoneidad que tiene el territorio y lo integra con la valoración económica del mismo.

RESULTADOS

Modelo de idoneidad

El resultado del modelo de idoneidad está representado en la Figura 3, que puntúa las distintas alternativas con valores de 0 a 1. Primero se ha determinado el nivel mínimo aceptable para establecer las áreas idóneas que podrán recibir lodos, siendo 0.7 el valor mínimo fijado. El conjunto de las alternativas se distribuyen principalmente en la depresión central de Cataluña, el valle del Ebro y algunas regiones de la llanura litoral catalana. Se puede observar que las áreas con valores por debajo del 0.7 se sitúan en los cursos fluviales, la región de los Pirineos y el sistema de montañas del litoral, debido a la vulnerabilidad que presentan los acuíferos o los cursos fluviales. Las áreas por encima de los 0.7 presentan buenas características estructurales del suelo, pero el factor más influyente es el tipo de cultivo, ya que las regiones de fruta y cereal son aquellas con los valores de idoneidad más altos. Estas zonas se encuentran en la depresión central, valle del Ebro y la parte sur de las llanuras litorales.

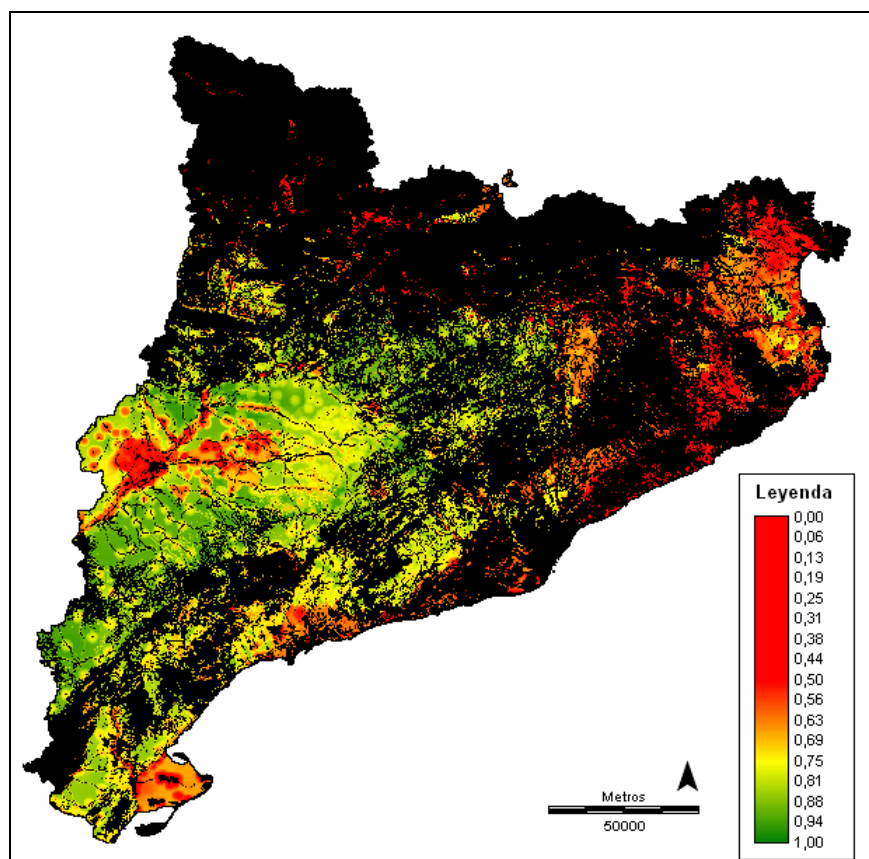


Figura 3. Mapa del modelo de idoneidad.

Modelo económico

La Figura 4a presenta el resultado del cálculo para la agregación del lodo. Hay una diferencia de 6 €/tMS según el tipo de cultivo, siendo más económico la agregación en el tipo de cultivo de cereal que en los frutales. La Figura 4b muestra el coste del transporte, presenta los resultados en €/tMS en función de la distancia euclidiana calculada en 4 búferes alrededor de Barcelona. Evidentemente es más económico así como también sostenible aplicar el fango dentro de la primera corona, implicando la duplicación de los costes en la última corona.

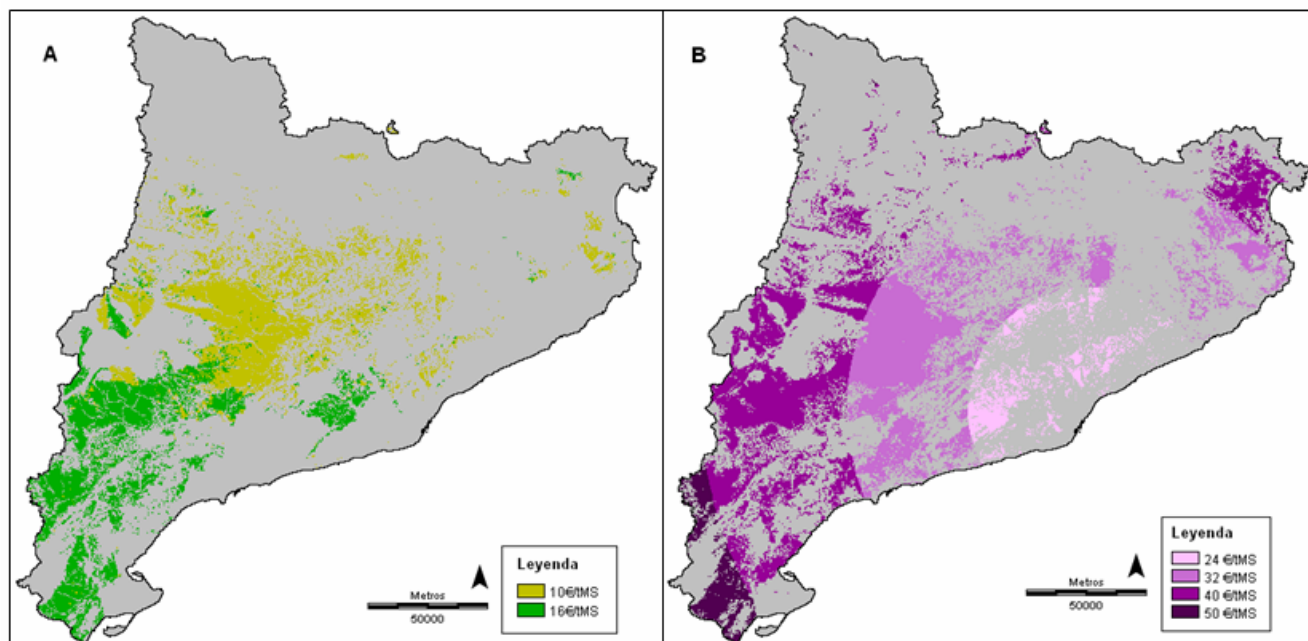


Figura 4. a). Mapa de los costes de agregación. b) Mapa de los costes del transporte.

La Figura 5 muestra el resultado del modelo económico. El mapa está expresado en €/tMS y su importe está muy condicionado por los costes de transporte, es decir, la distancia a la que se aplican los lodos para un mismo tipo de cultivo, hasta tal punto que puede representar un incremento de un 95% en el precio final. Asimismo el tipo de cultivo donde se aplica el lodo también influye en el coste total. Por todo esto es más económico aplicar el lodo en las alternativas más próximas y en cultivo de cereal.

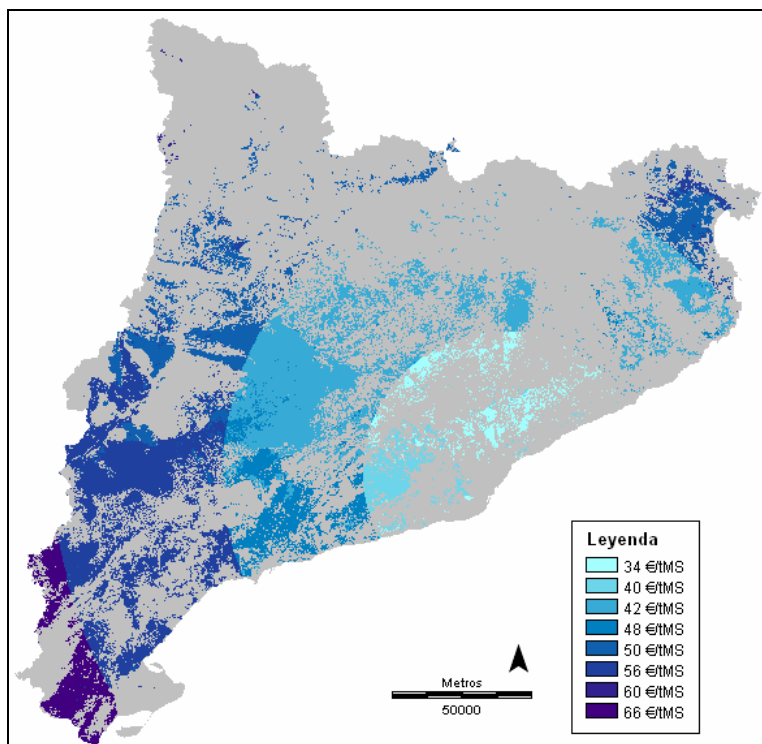


Figura 5. Modelo económico.

Índice de calidad

Se han realizado dos cálculos del resultado final empleando distintos pesos para el modelo económico y el de idoneidad. En la Figura 6 se ha aplicado el mismo peso en ambos modelos ($W_I = 0,5$ y $W_E = 0,5$), en cambio, la Figura 7 presenta el resultado dando más peso al modelo de idoneidad, con un 0.6 y un 0.4 al modelo económico ($W_I = 0,6$ y $W_E = 0,4$). Hemos considerado que el factor económico es importante, pero no debe ser el más relevante, ya que en cuestiones de reaprovechamiento de residuos se debe priorizar la sostenibilidad medioambiental y social, utilizando así pesos iguales en ambos modelos o superiores para el modelo de idoneidad, que tiene en cuenta factores ambientales y sociales.

En el primer resultado se ha contabilizado que hay aproximadamente 600.000 ha con valores superiores a 0.7, esta superficie sería más que suficiente para el uso del lodo depurado procedente de la capital catalana. Fijándonos en el mapa, se puede observar que el IC es superior en los suelos más próximos a la región metropolitana de Barcelona y que, cuanto más se aleja, estos valores disminuyen. Comparando este resultado con el mapa de idoneidad de suelos, se puede destacar que las áreas agrícolas de la depresión central han disminuido los valores, mientras que las regiones más próximas a Barcelona han incrementado las cifras. Este cambio se debe al factor del coste de transporte, que se ha introducido con el mapa económico y deja ver la importancia del factor distancia en el cálculo del IC.

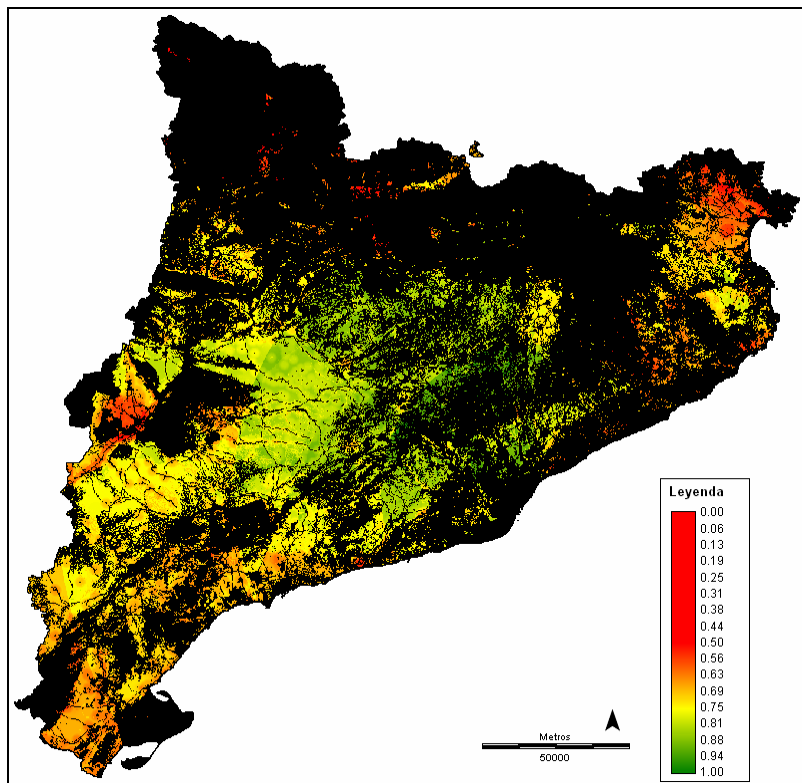


Figura 6. Mapa del IC, $W_I = 0,5$ y $W_E = 0,5$.

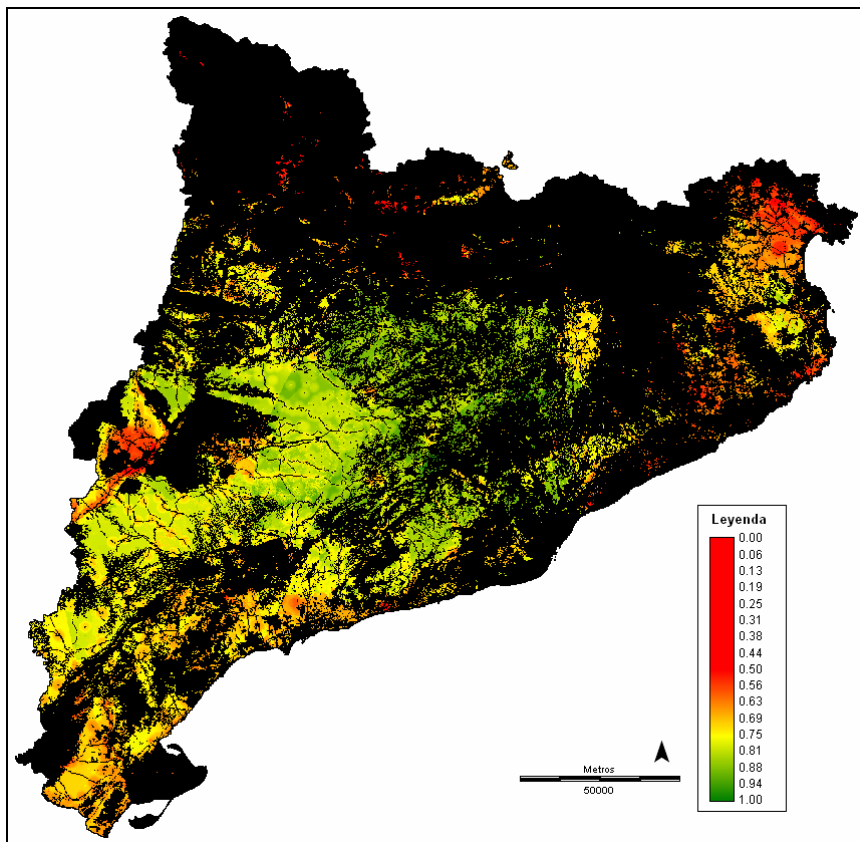


Figura 7. Mapa del IC, $W_i = 0,6$ y $W_E = 0,4$.

En el segundo caso, se ha atribuido más peso al modelo de idoneidad. Esta diferencia en los pesos refleja algunos cambios en los resultados. En primer lugar, ha incrementado el número de hectáreas por encima del valor 0.7, llegando a 650.000 ha. En segundo lugar, se observa que el coste de transporte ha bajado su importancia para este IC, como consecuencia de la reducción en el peso del modelo económico. Así pues, el incremento en hectáreas por encima del valor mínimo aceptado se explica por la disminución de la influencia del modelo económico, ya que estas 50.000 ha, estarían situadas en las regiones más alejadas de Barcelona. Es decir, que en comparación al primer resultado, éste ha reducido los valores del IC para los cultivos más próximos a la región de estudio, pero los ha aumentado para los más lejanos.

CONCLUSIONES

Este modelo pretende ser una propuesta para la determinación de áreas agrícolas adecuadas a la incorporación de lodos teniendo en cuenta factores medioambientales, sociales y económicos. En la sociedad actual de producción y consumo, se tiene que apostar por una preservación medioambiental y control de los riesgos sociales, sin dejar de lado los factores económicos. La metodología planteada para el cálculo del IC ha permitido introducir criterios económicos en el modelo de idoneidad. Este factor a la vez permite incorporarlos como un modelo externo en el cálculo del impacto social y medioambiental, y se presenta como una fórmula eficiente para poder determinar el papel que debe tener el aspecto económico en el modelo final.

El hecho de presentar dos resultados distintos del IC ha permitido comprender mejor la influencia que tienen cada uno de los modelos. La experiencia puede considerarse como un acercamiento al análisis de sensibilidad que nos ha permitido observar que el factor económico actúa más restrictivamente cuanto más peso tiene, pero sólo para las áreas más lejanas a la región productora de lodos, ya que se obtienen valores altos para los píxeles cercanos, y más bajos para los más lejanos.

Este modelo económico se aprecia como una buena primera propuesta, pero para incrementar su precisión se deberían introducir algunos cambios, como sustituir el cálculo de la distancia euclidiana por la distancia real, incorporando el tiempo, el coste y el trayecto por las vías de comunicación. Esta modificación mejoraría sustancialmente el cálculo de los costes de transporte, aspecto importante, ya que los resultados han mostrado que este mapa es el que tiene más importancia en el cálculo del IC. También sería interesante mejorar el modelo desde el punto de vista de la contabilización de lo que se ahorran los agricultores en fertilizantes, aspecto que también permitiría perfeccionarlo.

El modelo presentado ha sido diseñado para ser aplicado en los procesos de toma de decisiones, ya que permite evaluar y ponderar la adecuación de un territorio ante una problemática determinada. Para su elaboración se ha tenido en cuenta la opinión de los distintos agentes que participan en el proceso de decisión, cómo los gestores o la administración, y actualmente también se está trabajando con ellos en su validación. Cabe considerar que como futuro trabajo sería interesante integrar las distintas depuradoras que se encuentran en Cataluña y generar un modelo de gestión que supervise el destino final de los lodos producidos en toda el área de estudio. Este modelo de gestión tendría que estar enfocado hacia una optimización de los recursos, de forma que se genere un modelo que pueda distribuir el lodo por toda Cataluña, priorizando aquellas zonas más próximas de las estaciones de tratamiento de aguas residuales, ya que implicarán una reducción en los costes de transporte y en la contaminación atmosférica, obteniendo un modelo más sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha estado financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, No CTM2007-64490, y el proyecto SOSTAQUA, fundado por el CDTI en el marco del Programa Ingenio 2010 de la convocatoria CENIT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agència Catalana de l'Aigua (2008): Resum de dades de producció i gestió de fangs. Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya. <http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?nfpb=true&pageLabel=P1224854461208201510244>

Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural. Resolució AAR/1779/2009 del 20 de mayo del 2009, por la que se da publicidad a la aprobación de las normas técnicas específicas de producción integrada de fruta de semilla, fruta de hueso, hortalizas, cítricos, fruta seca, olivas, uva para vinificación, cereales de invierno, cereales de verano, fruta seca elaborada y aceite, así como a los parámetros de los cuadernos de explotación y cuadernos de conservación o postcosecha de producción integrada. DOGC núm. 5409, de 29.6.2009.

Dujmović, J.J. (2007): Continuous Preference Logic for System Evaluation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 15(6), 1082-1099.

EU (2006): Directive 2006/12/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on waste. Official Journal, L 114, 27.4.2006, p. 9-21.

EU (1986): Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. Official Journal, L 181, 4.7.1986, p. 6-12.

Institut d'Estadística de Catalunya Idescat (2010): *Idescat: Padró continu*. <http://www.idescat.cat/>

Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. BOE número 262 de 1.11.1990, p. 32339 - 32340.

Passuello, A.; Schuhmacher, M.; Mari, M.; Cadiach, O. y Nadal, M. (2010): A spatial multicriteria decision analysis (SMCA) to manage sewage sludge application on agricultural soils. En: Olej, V. et al. (Ed.), *Environmental Modeling for Sustainable Regional Development: System Approaches and Advanced Methods*. IGI Global. En prensa.

Voogd, H. (1983): *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. London, Pion.