

INTEGRACIÓN SIG-EMC-ANÁLISIS DE AGRUPAMIENTO COMO HERRAMIENTA PARA LA REGIONALIZACIÓN ACUÍCOLA EN URUGUAY

Ismael Díaz*, Ana Laura Mello, María Salhi***, Mónica Spinetti****, Martín Bessonart***** y Marcel Achkar*******

* Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Uruguay. (idiaz@fcien.edu.uy)

** Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Uruguay. (amello@fcien.edu.uy)

*** Laboratorio de Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Uruguay. (msalhi@fcien.edu.uy)

**** Departamento de Acuicultura y Aguas Continentales, Dirección Nacional de Recursos Acuáticos-MGAP. Uruguay. (mspinet@dinara.gub.uy)

***** Laboratorio de Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República; Estación Experimental de Investigaciones Marinas y Acuicultura - Dirección Nacional de Recursos Acuáticos-MGAP. Uruguay. (martinb@fcien.edu.uy)

***** Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio, Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Uruguay. (achkar@fcien.edu.uy)

RESUMEN

La planificación del territorio es un instrumento clave para el impulso de una actividad económica, y la regionalización a partir de la aptitud del territorio es una escala de elevado potencial para avanzar en el proceso de planificación.

La integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluaciones Multicriterio (EMC) presenta gran utilidad para la generación y sistematización de la información necesaria para evaluar la aptitud del territorio. En adición, la estadística espacial se presenta como una herramienta poderosa para el análisis espacial y la definición de unidades territoriales homogéneas, posibilitando de esta manera la definición de regiones de especialización productiva.

El objetivo de este trabajo fue definir regiones de aptitud para la producción acuícola en Uruguay que contribuyan con la definición de planes de ordenamiento territorial para la actividad.

La estrategia metodológica integró el desarrollo de un SIG y la aplicación de una EMC, implementada mediante consultas a expertos a partir del método Delphi y el método AHP. Posteriormente, la información se analizó utilizando autocorrelaciones espaciales (Índice de Moran) y análisis espaciales de agrupamiento.

La modelación se realizó a escala de cuenca hidrográfica. Se evaluó la aptitud de 5 sistemas de producción acuícola a partir de 41 variables (geofísicas, sociales, económicas y productivas).

Se logró identificar la potencialidad del territorio uruguayo para el desarrollo de la producción acuícola para los 5 sistemas analizados. La aptitud acuícola para cada sistema presenta elevada autocorrelación espacial lo cual permitió la identificación y definición de una regionalización de aptitud acuícola.

El resultado obtenido se presenta como un insumo de base para la elaboración de planes para el desarrollo del sector acuícola, así como también para la elaboración de instrumentos y políticas de ordenamiento territorial de la actividad.

Palabras clave: SIG, EMC, estadística espacial, regionalización

ABSTRACT

Land planning is a key instrument to promote an economic activity, and the regionalization through land suitability is a powerful scale to progress into land planning process.

Integration of Geographic Information Systems (GIS) and MultiCriteria Assessment (MCA) is very useful to generate and systemize the information required to assess land suitability. Additionally, geostatistics is presented as a powerful tool for spatial analysis and definition of homogenous territorial features, thus enabling the definition of specialized productive regions.

The objective of this work was to define regions according to their suitability for aquaculture in Uruguay, which contribute with the definition of land use plans for this activity.

The methodological strategy included the integration of GIS and MCA, implemented through expert consultation using both, Delphi and AHP methods. After that, the information was analyzed using spatial correlations analysis (Moran's Index), and spatial clustering analysis.

The modeling was made at basin scale. The assessment included 5 aquaculture production systems generated from 41 variables (geophysical, social, economic and productive variables).

The suitability of Uruguayan's land for the development of the aquaculture under the 5 systems analyzed was identified. Aquaculture suitability of each system presented a high spatial correlation, allowing the identification and definition of a regionalization of the aquaculture suitability.

The results obtained constitute a primary input to advance in the generation of aquaculture development plans and the generation of land planning policy.

Key words: GIS, MCA, geostatistics, regionalization

INTRODUCCIÓN

La planificación del territorio tiene entre sus objetivos identificar y adoptar las mejores opciones de uso para cada espacio del territorio, a través de la evaluación sistemática del potencial y las alternativas de uso del suelo tomando en consideración las condiciones biofísicas, sociales y económicas. Por lo general, es guiada por la necesidad de realizar cambios en el uso del suelo de forma de potenciarlo u optimizarlo, o como medida que permita prevenir cambios no deseados (FAO, 1993). En este sentido la planificación del territorio busca evaluar la necesidad y viabilidad de determinada actividad para un territorio dado, y proponer una localización que minimice los impactos negativos y maximice los positivos (Bosque Sendra y García 2000).

Las evaluaciones de la aptitud del suelo como insumo para la planificación del uso y gestión del territorio han tenido un importante desarrollo en las últimas décadas. Se destacan estudios de aptitud del territorio para la planificación de actividades industriales, agrícolas, y del sector terciario (Bosque Sendra y Moreno, 2004; Santé y Crecente, 2005; Méndez, 2006; Galacho y Arrebola, 2008; Palomo, 2015). En el caso de las actividades acuícolas, éstas presentan un importante nivel de desarrollo a diversas escalas (Nath et al. 2000), continental (ej: Kapetsky, 1994; Kapetsky y Nath 1997), nacional (ej: Meaden, 1987; Aguilar-Manjarrez, 1992) y destacándose en los últimos años un notorio crecimiento de los estudios a escala local (ej: Arnold et al., 2000; Hossain et al., 2007; Radiarta et al., 2008; Hadipur et al., 2014).

Los procesos de planificación del territorio encierran una alta complejidad debido a que demandan la integración de múltiples dimensiones (biofísica, económica, política y social) y actores, así como el análisis de sus interacciones e intereses, particularmente en relación con las necesidades y requerimientos de las diferentes actividades productivas. La construcción de escenarios sobre la base de la aptitud de uso del territorio, permiten avanzar en la promoción y planificación del desarrollo de actividades productivas (Peterson et al. 2003). A esto se le suma la consideración de las diferentes escalas espaciales las cuales también interactúan entre sí, más allá de la escala específica a la que refiera la planificación (local, nacional, regional).

Uno de los primeros pasos en el proceso de planificación es la definición de la unidad territorial sobre la que se basará. Esto determinará su alcance y las necesidades de información tanto en lo que refiere a cantidad de variables a considerar así como a su nivel de detalle. Las cuencas hidrográficas se presentan

actualmente como las unidades más adecuadas en la que basar la planificación del territorio debido a que son unidades definidas por los regímenes hidrológicos naturales en las cuales es posible implementar una gestión integrada de los recursos hídricos y otros bienes de la naturaleza (Sheng, 1992; Duarte y Pérez Guevara, 1998; Caire, 2008; Aguirre, 2011). A su vez, esta característica también las hace adecuadas para la definición de regiones productivas en el marco de procesos de planificación del uso del suelo. La planificación a escala regional integra varias cuencas hidrográficas y es importante como insumo para la elaboración de políticas a largo plazo (Sheng, 1992). En este sentido, como primer paso en la definición de regiones de aptitud para una actividad productiva determinada, así como para la ordenación del uso de suelo en una región, se requiere contar con una evaluación de la aptitud del suelo a nivel del territorio.

Debido a la ya mencionada complejidad de este tipo de análisis, la integración de los sistemas de información geográfica (SIG) y las herramientas de evaluación multicriterio (EMC) se ha posicionado como el principal instrumento para la modelación y análisis del territorio relacionadas a la evaluación de alternativas espaciales sobre la base de criterios de aptitud (Jankowski et al., 2001; Malczewski 2006).

Por un lado, los SIG presentan potencialidad para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y presentar datos espacialmente referenciados (Moreno 2007), a lo que debe sumarse la capacidad para el procesamiento computacional de criterios de aptitud y selección de sitios (Meaden & Kapetsky, 1991, Kapetsky and Nath, 1997, Arnold et al., 2000). Paralelamente, las herramientas de EMC ofrecen un marco de análisis para identificar y combinar diferentes criterios en función de objetivos y reglas de decisión previamente definidos. Particularmente en los casos concretos de mapeo de índices de aptitud del suelo para diferentes usos, estas herramientas facilitan la integración de factores cuantitativos y cualitativos, así como factores físicos, biológicos, o socio-económicos.

Por lo general estas herramientas se han combinado exitosamente para el desarrollo de evaluaciones de aptitud del suelo cuyos resultados avanzan sobre propuestas de delimitación y caracterización de zonas de aptitud. No obstante, los procesos de planificación del territorio demandan la necesidad de integrar la variabilidad y heterogeneidad espacial existente dentro de un mismo rubro productivo para operativizar dichas propuestas.

Si bien las EMC han resultado ser útiles para mapear índices de aptitud para un área de estudio dada, han presentado limitaciones al momento de generar regionalizaciones basadas en estos índices (Joerin et al., 2001; Nayak et al., 2014), particularmente en la definición de regiones a partir de la combinación de los diferentes sistemas productivos bajo los cuales se puede desarrollar una actividad. Por este motivo, la elaboración de propuestas de regionalización productiva requiere auxiliarse de otras técnicas que permitan combinar y espacializar la aptitud del suelo para una determinada actividad integrando la variabilidad de los sistemas productivos bajo los cuales se desarrolla.

En este marco, la estadística espacial presenta elevado potencial para contribuir en la identificación de patrones espaciales y en la regionalización productiva. En este campo se presentan numerosos métodos, aplicados en diversos ámbitos y con diferentes resultados (Anselin 1996, Anselin y Bera 1998, Assuncao et al., 2006, Long et al., 2010). Dentro de la estadística multivariada, un método ampliamente utilizado que se destaca es el Análisis de Clusters. Dichos análisis permite encontrar grupos en un conjunto de datos (Kaufman y Rousseeuw 1990) siendo un procedimiento de clasificación que consiste en identificar los clusters naturales en una serie de datos, donde la solución está dada por aquel agrupamiento que minimice las distancias entre los elementos de un grupo (lo más similares posibles), y que las maximice con respecto a otros grupos (sean lo más diferentes posibles). Los análisis de agrupamiento espaciales adicionan a los métodos clásicos de análisis de agrupamiento, la posibilidad de incorporar la posición geográfica - espacial como una nueva variable para la asignación de restricciones en la definición de agrupamientos. En este sentido es que permite agrupamiento en función de sus atributos y de su localización.

En Uruguay, la acuicultura es una actividad marginal y practicada principalmente en zonas continentales. Desde 2002 y a partir del desarrollo del Plan Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura Sostenible, se ha identificado la necesidad de fortalecer el sector. Asimismo, este Plan estableció la necesidad de avanzar hacia una zonificación para el desarrollo de la acuicultura nacional, lo que ha permitido la elaboración de una propuesta mediante un proyecto ejecutado entre la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos, la Universidad de la República y la FAO.

Como resultado de este proyecto, Uruguay dispone actualmente de una evaluación de aptitud para el desarrollo de acuicultura con un elevado nivel de detalle

(a la escala de 1km²), en base a los principales sistemas de producción (Achkar et al., 2013). Asimismo, este trabajo confirma que gran parte del territorio uruguayo presenta aptitud media o alta para el desarrollo de la acuicultura, y a excepción de las zonas urbana y zonas de suelos superficiales, el resto del territorio en general no presenta restricciones geofísicas para su desarrollo.

A partir de esta evaluación, y como forma de generar nuevos insumos para el desarrollo de esta actividad, el objetivo de este trabajo fue identificar y definir regiones de aptitud para la producción acuícola en Uruguay, que contribuyan con la definición de planes de ordenamiento territorial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

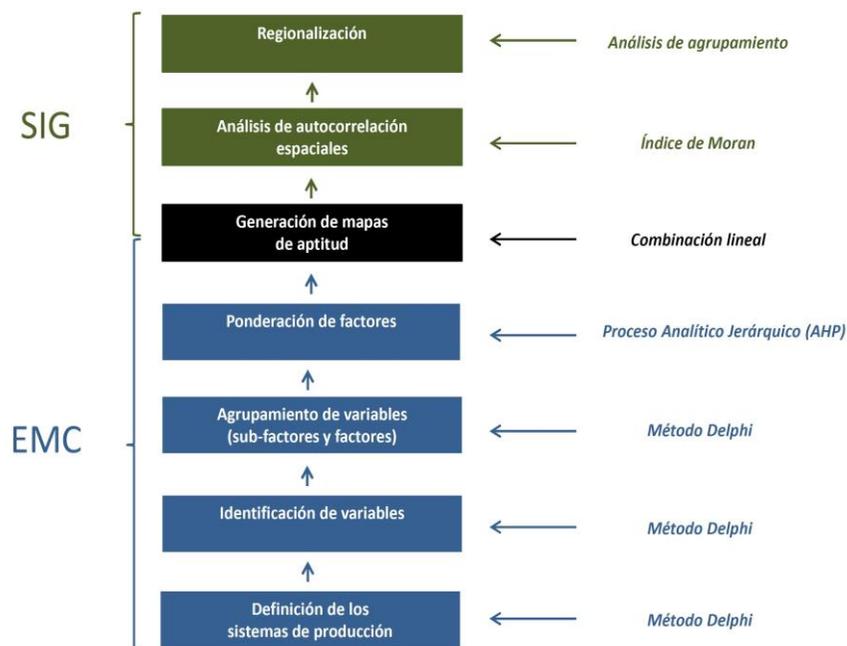
La zona de estudio comprendió el territorio terrestre de Uruguay, que se sitúa entre los 30° 05' y 34° 58' de latitud sur y los 53° 11' y 58° 26' de longitud oeste, y ocupa una superficie total de 176.615 km².

El clima es templado, húmedo y ventoso, con pocas variaciones microregionales. La temperatura media anual presenta un leve gradiente descendente de 3°C de occidente (17°C) a oriente (20°C). Las precipitaciones acumuladas anuales varían entre 900 y 1500 mm entre el sur y el norte del país. Las principales actividades agropecuarias son la ganadería extensiva, los cultivos de verano (soja y arroz) y la forestación de especies exóticas. El sector pesquero es mayormente industrial, la actividad acuícola es marginal dentro del sector pesquero uruguayo y se basa principalmente en producción de especies de agua dulce, mayormente peces.

Estrategia metodológica

La estrategia metodológica incluyó la integración de una EMC y el procesamiento de la información mediante el desarrollo de un SIG. En este proceso se integraron consultas a expertos y finalmente para la regionalización se recurrió a técnicas del campo de la estadística espacial (Figura 1).

Figura 1. Estrategia metodológica empleada.



[Fuente: Elaboración propia]

Definición de los sistemas de producción

En primera instancia y mediante una ronda de expertos utilizando el método Delphi (Linstone y Turoff 2002), se definieron los sistemas de producción de mayor aptitud para el desarrollo de la acuicultura en Uruguay. Para esto se consideraron las prácticas acuícolas actuales, tecnologías existentes y la viabilidad económica para la implementación de nuevos sistemas. Los 5 sistemas de producción definidos fueron:

- i. Cultivos intensivos en estanques construidos en tierra (CIE).
- ii. Cultivos semi-intensivos en estanques construidos en tierra (CSIE).
- iii. Cultivos dulceacuícolas en piletas (CDP).
- iv. Cultivos en jaulas flotantes de agua dulce (CJF).
- v. Cultivos marinos o estuarinos en instalaciones en tierra (CIT).

Tanto la Evaluación Multicriterio como la Regionalización comprendieron la integración de estos 5 sistemas de producción.

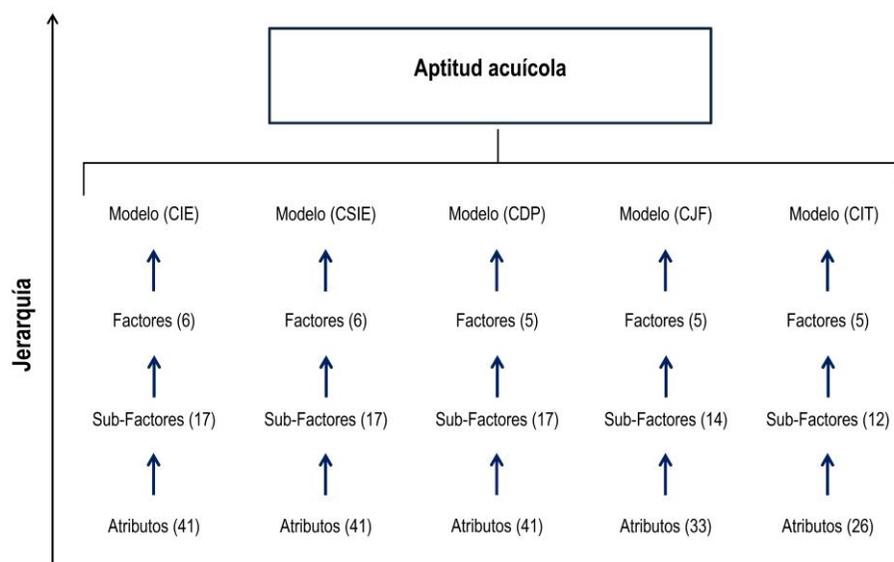
La información utilizada para el desarrollo de la propuesta de regionalización se sistematizó a escala de cuenca hidrográfica, unidad de análisis definida para el presente estudio. En este sentido se referenció la información en 50 cuencas hidrográficas que comprenden todo el territorio uruguayo. La totalidad de los procesamientos se realizaron utilizando el programa ArcGis 10.1 (ESRI, 2012).

Identificación y agrupación de variables

La modelación se desarrolló a partir de la generación de un modelo de estructura jerárquica en el cual las variables se agrupan generando nuevas variables de orden superior y mayor jerarquía. Se tomó como base el modelo jerárquico propuesto por Malczewski (2000) y Nath et al. (2000) y se procedió a la agrupación de las variables.

El proceso de identificación y agrupación de variables, en todos sus niveles, se determinó mediante del desarrollo de rondas de expertos en las que se trabajó aplicando el método Delphi. Esto permitió definir el conjunto de variables que posibilitan, favorecen, limitan o impiden el desarrollo de la producción acuícola en Uruguay según los 5 sistemas productivos definidos. Estas variables, que corresponden a los parámetros cuantificables, se denominaron atributos. Los atributos se agruparon en sub-factores, lo cuales posteriormente fueron agrupados en factores (Figura 2). El proceso de agrupación de variables, en sus diferentes niveles, se desarrolló con la participación de 30 técnicos y científicos vinculados a la acuicultura.

Figura 2. Estructura jerárquica de los niveles de agrupamiento de la información utilizada en la modelación. Se presenta en cada nivel el número de elementos que son integrados para conformar el nivel superior siguiente. CIE (Cultivos intensivos en estanques construidos en tierra), CSIE (Cultivos semi-intensivos en estanques construidos en tierra), CDP (Cultivos dulceacuícolas en piletas, CJF (Cultivos en jaulas flotantes de agua dulce) y CIT (Cultivos marinos o estuarinos en instalaciones en tierra).



[Fuente: Elaboración propia]

Como resultado de este proceso se identificaron 41 atributos pertenecientes a las dimensiones biofísica (ej: pendiente, precipitación anual acumulada, temperatura media anual), socioeconómica (ej: acceso a mercados, cercanía a áreas turísticas, densidad de población), política-administrativa (ej: planes de ordenamiento territorial, áreas de conservación y protección) y productiva (ej: presencia de emprendimientos acuícolas, accesibilidad a caminería, accesibilidad a fuentes de energía). Estos atributos se agruparon en sub-factores los cuales posteriormente dieron lugar a los factores de producción. Los factores identificados fueron disponibilidad de agua (DA), aptitud del suelo (AS), condiciones territoriales (CT), articulación comercial (AC), situación ambiental (SA) y uso del suelo (US).

Ponderación de los factores

Numerosas técnicas han sido desarrolladas para la determinación del peso de cada factor (Saaty 1980, Saaty 1994, Malczewski 2000). En este estudio la ponderación se definió mediante consultas a expertos utilizando el método AHP (Saaty 1980). El AHP es un método matemático creado para estructurar, medir y evaluar alternativas a partir de la experiencia y el conocimiento de expertos, especialistas e informantes calificados. Es uno de los métodos más utilizados en la las EMC (Lee et al., 2008).

Para su desarrollo se generó una matriz que permitió comparar las variables de a pares de variables. De esta manera cada especialista completa una matriz de doble entrada en la cual se enfrentan todas las variables componentes del sistema, expresando en cada caso la contribución relativa de cada variable, en la determinación de la aptitud acuícola, respecto a la variable con la que se la compara. En las celdas de la matriz se incorporan valoraciones dentro de la escala de 1 a 9, donde 1 significa que las variables presentan igual importancia y 9 que una variable presenta mucho más importancia que la otra. Los valores inversos son utilizados para expresar una relación inversa entre las variables (Saaty 1980).

Una vez desarrollada la consulta y completada la matriz por el especialista se procede a la verificación de la consistencia de sus respuestas. Las matrices con resultados consistentes finalmente son integradas para la estimación del peso relativo de cada variable.

La implementación de la matriz, la estimación de la consistencia y la estimación de los pesos relativos de los factores fueron desarrollados utilizando el programa R (R Core Team, 2015) y la librería "pmr" (Lee y Yu, 2015).

Generación de mapas de aptitud

La generación de los mapas de aptitud presentó dos etapas bien diferenciadas. Una primera etapa de generación y sistematización de la información, en la cual se diseñó el SIG, se relevaron los 41 atributos que inciden en la definición de la aptitud acuícola y se estimaron sus valores para todo el territorio uruguayo. Y una segunda etapa determinada por la implementación del modelo de aptitud, el cual se construyó a partir de la combinación lineal ponderada de los factores (Malczewski 2000) (Ec 1), donde el resultado final (S) corresponde a la sumatoria del producto de cada factor (F) por su ponderador (P). Los valores de los factores previamente se estandarizaron entre 1 (poco apto) y 15 (muy apto), resultando finalmente una valoración de aptitud en la escala de 1 a 15. Los factores que actuaron como restricciones, impidiendo el desarrollo de la acuicultura, presentaron valor 0.

$$\text{Ec. 1} \quad S(x_i) = \sum p_j F_{ij}$$

Análisis de autocorrelaciones espaciales

Una vez generada la información de aptitud acuícola a escala de cuenca para los 5 sistemas de producción, se procedió al análisis de autocorrelación espacial en la distribución de los valores de aptitud. Se utilizó el Índice de Moran, estadístico que mide la autocorrelación espacial a partir de la localización de las entidades (en este caso las cuencas) y sus valores (Moran 1950). Los valores del índice varían entre -1 y 1. Valores de 0 indican la ausencia de autocorrelación espacial, valores cercanos a 1 presencia de autocorrelación espacial positiva y finalmente valores cercanos a -1 presencia de autocorrelación espacial negativa. El análisis se realizó utilizando el software ArcGis 10.1 (ESRI, 2012). En todos los casos se utilizó el método de distancia euclidiana, se conceptualizó la distancia mediante el inverso de ésta, y se consideró un nivel de significancia $p < 0,05$.

Regionalización

Tras constatar la existencia de autocorrelaciones espaciales elevadas y estadísticamente significativas se empleó como método de asociación para la generación de regiones, el análisis de agrupamiento. Dicho método opera de forma similar al método clásico de asignación de cluster, el que consiste en identificar grupos naturales en una serie de datos y en donde la solución está dada por el agrupamiento que minimice las distancias entre los elementos de un grupo y las maximice con respecto a otros grupos (Kaufman y Rousseeuw 1990). Los análisis de agrupamiento espacial permiten incorporar la localización como una nueva variable para la definición de agrupamientos, generando de esta manera agrupamientos en función de atributos y también de localización (Anselin 1996, Anselin y Bera 1998, Assuncao et al., 2006, Long et al., 2010).

RESULTADOS

La disponibilidad de agua fue el factor más importante en 4 de los 5 sistemas de producción. Únicamente no lo fue en el sistema CIE, en el que la aptitud del suelo se posicionó como el factor de mayor relevancia. El factor articulación de mercados presentó valores medios, el factor condiciones territoriales valores bajos, y el factor situación ambiental presentó valores bajos para 4 de los 5 sistemas. El factor uso del suelo presentó valores bajos para 3 sistemas (CIE, CSE y CJF) y valores medios para los dos restantes (CDP y CIT) (Tabla 1).

La mayoría de las cuencas analizadas presentaron aptitud media a alta para al menos un sistema productivo (Figura 3). El sistema CDP fue el que presentó los mayores valores de aptitud, seguidos de los sistemas CSIE y CIE. El sistema CJF presentó valores en general altos, pero es necesario destacar que este sistema tiene una zona de localización restringida, específicamente en sistemas acuáticos (lóticos o lénticos) profundos. El sistema CIT presentó la imposibilidad de desarrollarse en la mayor parte del territorio, debido a la inviabilidad que presentan las cuencas lejanas a la costa de abastecerse de agua estuarina u oceánica.

Los mayores valores de aptitud se registraron en las cuencas localizadas en la zona sur, seguidas de la zona central y finalmente los valores más bajos se localizaron en la zona norte del país.

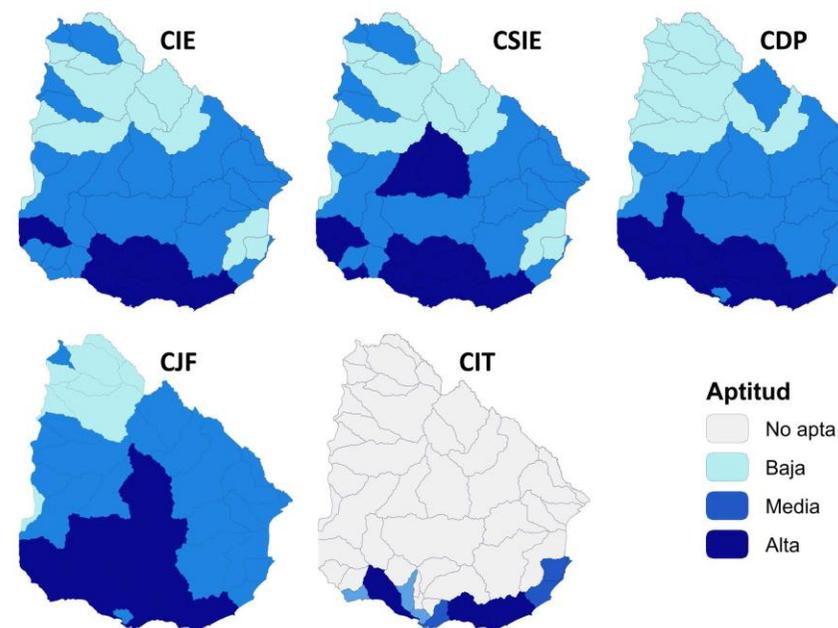
Tabla 1. Ponderadores obtenidos para los factores que componen los 5 sistemas de producción considerados. CIE (Cultivos intensivos en estanques construidos en tierra), CSIE (Cultivos semi-intensivos en estanques construidos en tierra), CDP (Cultivos dulceacuícolas en piletas, CJF (Cultivos en jaulas flotantes de agua dulce) y CIT (Cultivos marinos o estuarinos en instalaciones en tierra). NC= No corresponde.

SISTEMA DE PRODUCCIÓN	CIE	CSE	CJF	CDP	CIT
Aptitud del suelo	0,29	0,19	NC	NC	NC
Disponibilidad de agua	0,23	0,30	0,40	0,39	0,35
Uso del suelo	0,11	0,10	0,20	0,19	0,10
Condiciones territoriales	0,10	0,12	0,12	0,15	0,11
Articulación de mercados	0,14	0,18	0,16	0,17	0,19
Situación ambiental	0,13	0,11	0,12	0,10	0,25

[Fuente: Elaboración propia]

La distribución espacial de los valores a escala de cuenca hidrográfica para los 5 sistemas de producción considerados evidenció la existencia de autocorrelación espacial positiva. Utilizando el índice de Moran, se descartó en todos los casos la hipótesis nula, lo cual indica una probabilidad muy baja que el patrón agrupado pueda ser el resultado de una probabilidad aleatoria. Dicha hipótesis se rechazó en los casos en los que la puntuación z fue mayor a 2.58 (o menor a -2.58) y los valores p fueron inferiores a 0.05. Este análisis arrojó valores elevados del índice de Moran para 4 de los 5 sistemas de producción. En adición arrojó valores z superiores a 4 y con p valores inferiores a 0.01 en todos los casos, lo cual indica la existencia de una autocorrelación espacial para los valores de aptitud de la totalidad de los sistemas de producción acuícola considerados (Tabla 2).

Figura 3. Aptitud acuícola para los los 5 sistemas de producción considerados. Cultivos intensivos en estanques construidos en tierra (CIE), Cultivos semi-intensivos en estanques construidos en tierra (CSIE), Cultivos dulceacuícolas en piletas (CDP), Cultivos en jaulas flotantes de agua dulce (CJF), Cultivos marinos o estuarinos en instalaciones en tierra (CIT).



[Fuente: Elaboración propia]

Tabla 2. Autocorrelación espacial (Índice de Moran) para los 5 sistemas productivos. Se presenta valor del índice, puntuación z y p valor.

Sistema	Índice de Moran	p	z	Observación
CIE	0.98	<0.01	>10	**
CSE	0.97	<0.01	>10	**
CDP	0.95	<0.01	>10	**
CJF	0,89	<0.01	>9	**
CIT	0.42*	<0.01	>4	**

[Fuente: Elaboración propia]

* Este valor bajo puede ser explicado por la distribución acotada del sistema a 9 cuencas localizadas al del sur país, única zona viable para el desarrollo del cultivo.

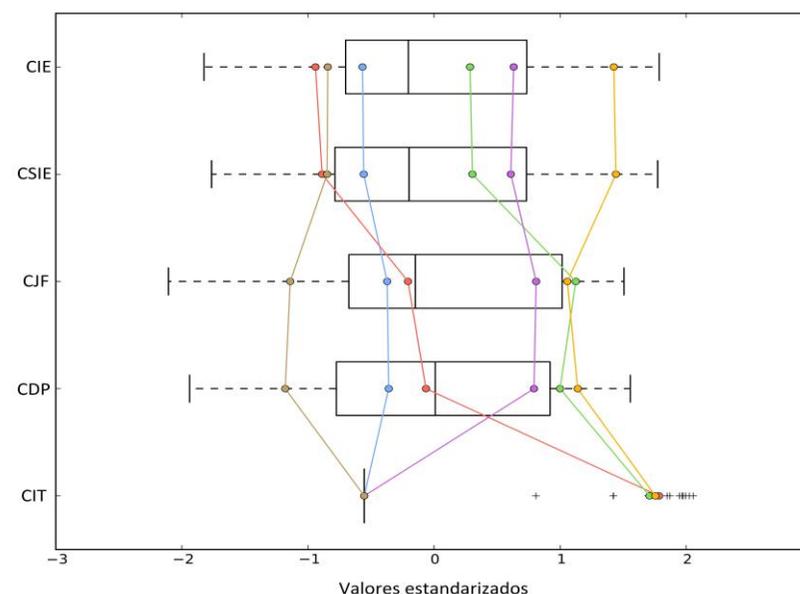
** Probabilidad <1% que el patrón agrupado sea resultado de una probabilidad aleatoria.

Posteriormente y producto del alto valor de autocorrelación identificado en la etapa anterior, se procedió a la identificación de grupos mediante análisis de agrupamiento. Primariamente se estimó el número óptimo de grupos (pseudo índice estadístico F Calinski-Harabasz). De acuerdo a los valores obtenidos se procedió al agrupamiento de los valores en 6 grupos.

El grupo de cuencas N°6 (marrón) presenta los menores valores de aptitud acuícola, presentando para 3 de los 5 sistemas de producción los valores más bajos (figura 4 y figura 5). Este grupo de cuencas, localizadas en la zona norte del litoral oeste del país presenta limitaciones para la producción acuícola ya sea por razones geofísicas (suelos superficiales al este) o por competencia con otros usos del suelo (agricultura intensiva y forestación de especies exóticas).

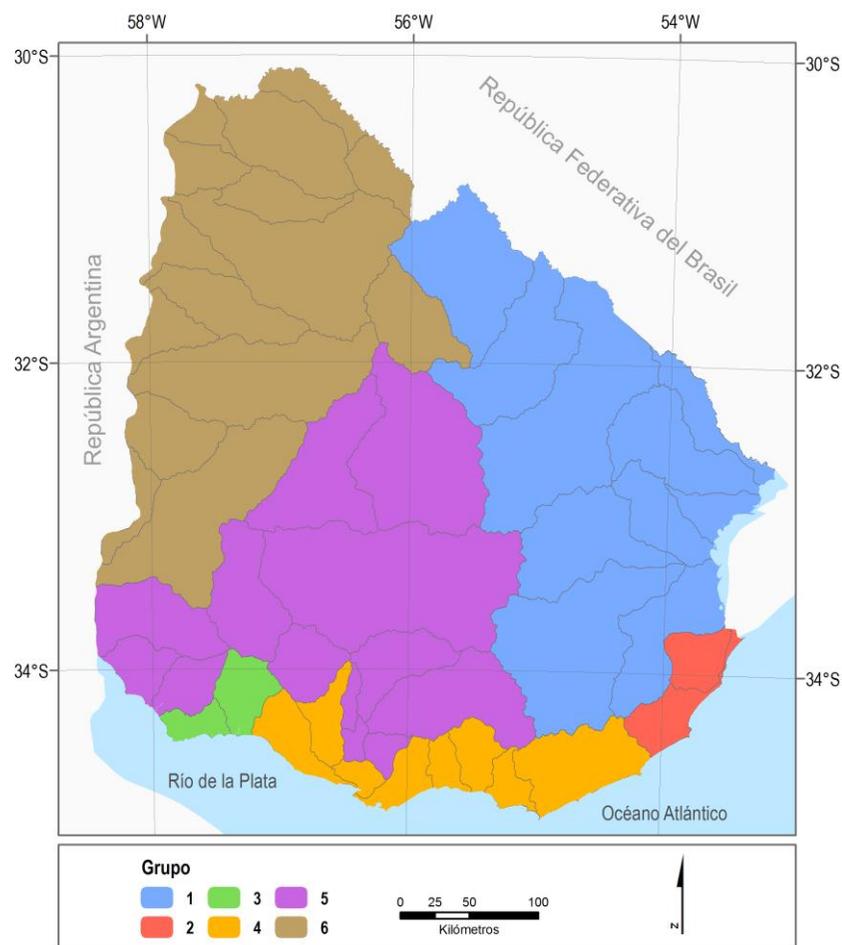
Este grupo es seguido por el grupo N°1 (celeste) que presenta el segundo lugar de valores más bajos en 3 de los 5 sistemas. Estos grupos de cuencas localizadas en la zona este del país presenta importantes superficies de planicies inundables y humedales en la zona este, y zonas serranas en la zona oeste. En adición presenta extensas superficies destinadas al cultivo de arroz, uso del suelo actualmente entendido en Uruguay como competencia con la acuicultura y no como actividades que se puedan integrar.

Figura 4. Diagrama de cajas para los 5 sistemas de producción. Se presentan valores estandarizados correspondientes a la aptitud acuícola de cada grupo de cuencas según el sistema productivo. CIE (Cultivos intensivos en estanques construidos en tierra), CSIE (Cultivos semi-intensivos en estanques construidos en tierra), CDP (Cultivos dulceacuícolas en piletas, CJF (Cultivos en jaulas flotantes de agua dulce) y CIT (Cultivos marinos o estuarinos en instalaciones en tierra).



[Fuente: Elaboración propia]

Figura 5. Grupos de cuencas definidas a partir del análisis de agrupamiento.



[Fuente: Elaboración propia]

Posteriormente y con un comportamiento muy similar al grupo N°1 se encuentra el grupo N°2 (rojo). Este grupo presenta valores bajos para la construcción de estanques en tierra principalmente debido a condiciones geofísicas, pero por otro lado su cercanía a la costa le brinda la posibilidad del desarrollo de cultivos marinos en instalaciones en tierra, alcanzando los mayores valores en ese sistema.

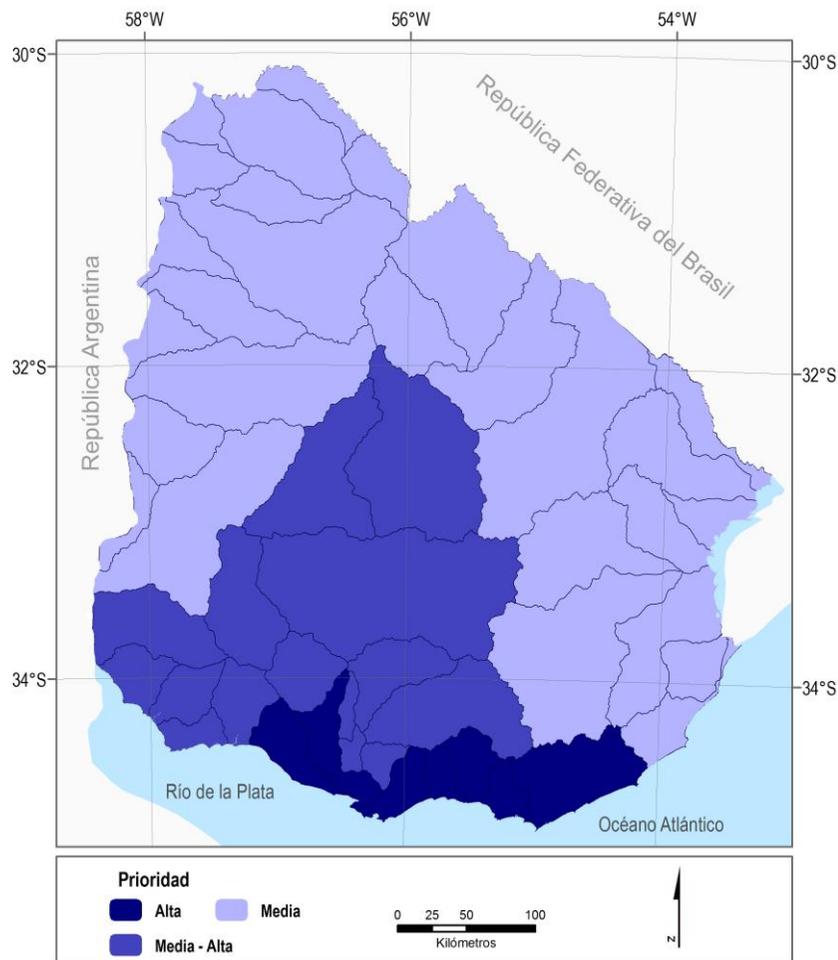
Los grupos N°3 (verde) y N°5 (violeta) presentan valores medios a altos, y además un comportamiento similar. Su principal diferencia se encuentra en la cercanía a la costa y su posibilidad de desarrollar cultivos estuarinos en instalaciones en tierra. Ambos grupos cuentan con muy buenas condiciones para el desarrollo de la acuicultura.

Finalmente el grupo con mayores valores de aptitud resultó ser el grupo N°4 (anaranjado) presentando los mayores valores en 4 de los 5 sistemas. Esta región reúne un conjunto de variables que determinan los valores altos, principalmente condiciones geofísicas apropiadas, cercanía a mercados consumidores, buenas infraestructuras, y además cercanía a la costa.

A partir de los agrupamientos realizados se destacan el grupo N° 4, el cual determinaría la región de las zonas de mayor potencial para el desarrollo de acuicultura; los grupos N°5 y N°3 que determinarían zonas de potencial medio; y finalmente los grupos N° 1, 2 y 6, los cuales determinarían una región que reúne a cuencas no prioritarias de acuerdo a su potencial, independientemente que presenten zonas con elevado potencial para el desarrollo de algún sistema productivo.

En este sentido se aprecia un claro gradiente de aptitud acuícola de norte a sur en la definición de las regiones de aptitud productiva y por tanto en la asignación de prioridad para el desarrollo de la acuicultura (figura 6).

Figura 6. Regionalización del territorio uruguayo en base a la prioridad para el desarrollo de la acuícola, según aptitud del territorio.



[Fuente: Elaboración propia]

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La mayor parte del territorio uruguayo presentó aptitud acuícola media o alta en al menos un sistema productivo. Estos resultados son concordantes con los estudios realizados para Sudamérica por Kapetsky and Nath (1997), que identifican alta potencialidad para el desarrollo de acuicultura en Uruguay. Además este trabajo constituye la primera evaluación de la aptitud acuícola del territorio a escala de cuenca hidrográfica expresada en función de la combinación de 5 diferentes sistemas de producción acuícola.

Por otra parte, este trabajo presenta el primer antecedente en el desarrollo de una propuesta de regionalización de la actividad acuícola en el país, en base a criterios de aptitud del suelo para el territorio continental uruguayo. Las experiencias anteriormente desarrolladas para otras actividades productivas se vinculan principalmente a: la producción ganadera mediante la generación del índice CONEAT que se vincula al potencial productivo de los suelos (MGAP, 1994), la evaluación de la aptitud del suelo para la producción agraria nacional (Álvarez y Cayssials, 1979) y la valoración de los suelos de prioridad forestal (Ley N°15.939, 1987). En general estas experiencias de evaluación de la aptitud del territorio para el desarrollo de actividades productivas se construyen a partir de las condiciones biofísicas y aunque se señala la importancia de las variables sociales, ambientales y económicas, estas no fueron integradas en los modelos espaciales. Este trabajo desarrolló una metodología que permite avanzar en la integración de variables para la planificación espacial de la promoción y desarrollo de actividades productivas en el territorio uruguayo.

Entre los principales resultados se constató una elevada autocorrelación espacial en los valores detectados de aptitud acuícola en el territorio uruguayo. No obstante, esto era esperado debido a la correlación existente entre las variables geofísicas consideradas en la elaboración del modelo de aptitud acuícola. Asimismo, existe también una clara correlación entre determinadas variables geofísicas y otras variables sociales y económicas (principalmente asociadas a infraestructuras y al uso del suelo agropecuario). Estas características explican que se hayan encontrado autocorrelaciones positivas para los 5 sistemas de producción considerados.

En este contexto, fue posible identificar grupos de cuencas en función de sus valores de aptitud. La agrupación de cuencas generada identifica 6 grandes grupos

que se diferencian a partir de la distribución espacial de las variables geofísicas, los principales usos del suelo y los principales mercados consumidores.

Esta regionalización resalta la existencia de un gradiente espacial de aptitud de norte a sur, generado a partir de la combinación de diversas variables, donde se destacan mayor aptitud edáfica, usos del suelo que generan menor competencia por el uso del agua, presencia de un mayor mercado laboral y consumidor.

En este sentido se detectó que la concentración de las zonas con elevado potencial acuícola se encuentran asociadas a zonas con importante concentración de otras actividades económica (industrial, servicios y turística). Los resultados obtenidos señalan que el potencial acuícola en el escenario económico y territorial actual de Uruguay se vincula en mayor medida a la diversificación productiva de zonas que actualmente presentan una actividad intensa, que a la generación de alternativas en las zonas menos desarrolladas del país.

Sin embargo, cabe resaltar que esta regionalización arrastra los supuestos adoptados en la etapa de evaluación de aptitud acuícola, donde no se consideró la presencia de mercados consumidores en países fronterizos y tampoco sistemas de producción aún no utilizados en Uruguay. El levantamiento de estas restricciones en nuevas modelizaciones podría determinar cambios en los valores de aptitud a escala nacional y por tanto en la regionalización propuesta.

El análisis de agrupamiento se presenta como un primer paso para la caracterización de la distribución espacial del potencial territorial de la acuicultura en Uruguay, y una primera regionalización a escala de cuencas hidrográficas del potencial acuícola del país. La regionalización identificada junto al importante nivel de detalle de la información constituye una herramienta con alto potencial para el apoyo a la toma de decisiones en el proceso de planificación de la actividad acuícola en Uruguay.

Sin perjuicio de lo anterior, y pese a aportar información de importancia para obtener una visión global e integral de la aptitud a nivel nacional, la escala utilizada impide considerar importantes zonas de aptitud acuícola localizadas en cuencas con valores medios o bajos. En este sentido abordajes que incrementen la escala y trabajen al interior de cada cuenca, se presenta como un paso necesario para abordar consecutivamente al análisis a escala de cuenca. Esta integración de abordajes

permitirá avanzar hacia niveles superiores de detalles y considerar zonas de alto potencial en cuencas con potencial medio o bajo.

En este sentido y posteriormente a la definición de una regionalización de carácter nacional, resulta necesario avanzar incrementando la escala de análisis, procesando la información a nivel intra cuenca hidrográfica.

AGRADECIMIENTOS

A los especialistas de la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (MGAP) y de la Universidad de la República que participaron en el proceso de consultas.

A las instituciones y científicos que brindaron sus datos para la elaboración del SIG.

BIBLIOGRAFÍA

ACHKAR, M., SALHI, M. Y DÍAZ, I. (2013). "Elaboración de una zonificación acuícola nacional (ZAN) para el territorio uruguayo". Informe técnico. UDELAR-DINARA-FAO, pp. 41.

AGUILAR-MANJARREZ, J. (1992). "Construction of a GIS for Tobasco State Mexico. Establishment of technical and social decision models for aquaculture development". MSc Thesis, University of Stirling, UK, pp. 125.

AGUIRRE NÚÑEZ, M. (2011) "La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos". Revista virtual REDESMA, N°5(1), pp.10-20.

ALVAREZ, C. Y CAYSSIALS, R. (1979). "Aptitud de uso pastoril de los suelos del Uruguay Montevideo (Uruguay)". Boletín Técnico MGAP. Montevideo, pp.19.

ANSELIN, L. Y BERA, A. (1998). "Spatial dependence in linear regression models with an introduction to spatial econometrics". En: Ullah, A. y Giles, D. E.: Handbook of Applied Econometrics, New York, pp. 237-289.

ANSELIN, L. (1996). "Local Indicators of Spatial Association- LISA". Geographical Analysis, N°27, pp 93-115.

ARNOLD, W.S., WHITE, M.W., NORRIS, H. A., Y BERRIGAN, M.E. (2000). "Hard clam (*Mercenaria spp.*) aquaculture in Florida, USA: geographic information system applications to lease site selection". *Aquacultural Engineering*, N°23, pp 203- 231.

ASSUNCAO R., NEVES, C. Y DA COSTA C. (2006). "Efficient Regionalization Techniques for Socio-Economic Geographical Units Using Minimum Spanning Trees". *International Journal of Geographical Information Science*, N°7(20), pp. 797-811.

BOSQUE SENDRA, J. Y GARCÍA, R. (2000). "El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial". *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, N°20, pp. 49-67.

BOSQUE SENDRA, J. Y MORENO, A. (2004): "Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos", Ra-Ma Editorial, Madrid, pp. 384.

CAIRE, G. (2008). "El manejo integrado de cuencas como instrumento para el desarrollo regional". En: Abardía, A; Morales, F. (coords). *Desarrollo Regional: reflexiones para la gestión de territorios*. México DF, Mc editores, pp.187-244.

DUARTE, G.L; PÉREZ GUEVARA, F. (1998) "Nota crítica: Aspectos básicos del enfoque global para el manejo de los recursos hídricos por cuencas hidrográficas". *Revista Región y sociedad*, N°9(16), pp.134-151.

ESRI. (2012). Environmental Systems Research Institute. ArcGIS 10.1. Version 10.1. Copyright ESRI Inc.

FAO. (1993). "Guidelines for Land Use Planning". Food and Agriculture Organization of the United Nations". Development Series 1, FAO/ AGLS, Rome, pp. 96.

GALACHO F.B. y ARREBOLA CASTAÑO, J.A. (2008). "El modelo de evaluación de la capacidad de acogida del territorio. Aspectos conceptuales y técnicas relacionadas". Baética: Estudios de arte, geografía e historia, pp. 21-40.

HADIPOUR A., VAFAIE F. Y HADIPOUR V. (2014) "Land suitability evaluation for brackish water aquaculture development in coastal area of Hormozgan, Iran". *Aquaculture International* N°23(1), pp. 329-343.

HOSSAIN, M.S., CHOWDHURY, S.R., DAS, N.G. Y RAHAMAN, M.M. (2007). "Multi-criteria evaluation approach to GIS-based land-suitability classification for tilapia farming in Bangladesh". *Aquaculture International*, N°15, pp. 425- 443.

JANKOWSKI, P., ANDRIENKO, N., Y ANDRIENKO, G. (2001). "Map-centred exploratory approach to multiple criteria spatial decision making". *International Journal of Geographical Information Science*, N°15(2), pp. 101-127.

JOERIN, F., THÉRIAULT, M., Y MUSY, A. (2001). "Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment". *International Journal of Geographical Information Science*, N°15(2), pp. 153-174.

KAPETSKY, J.M. (1994). "A strategic assessment of warm-water fish farming potential in Africa". CIFA Technical Paper, Rome, N° 27, pp. 67.

KAPETSKY, J.M. Y NATH, S.S. (1997). "A strategic assessment of the potential for freshwater fish farming in Latin America". COPESCAL Technical Paper. No. 10. Rome, FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/005/W5268E/W5268E00.HTM>

KAUFMAN L. Y ROUSSEEUW P.J. (1990). "Finding groups in data". John Wiley and Sons, New York, pp. 342.

LEE, P.H. Y YU, P.L. (2015). pmr: Probability Models for Ranking Data. R package version 1.2.5. <http://CRAN.R-project.org/package=pmr>

LEE A., CHEN W., Y CHANG C. (2008). "A fuzzy AHP and BSC approach for evaluating performance of IT department in the manufacturing industry in Taiwan". *Expert Syst Appl*, N°34, pp. 96–107

LINSTONE, H. A. Y TUROFF, M. (2002). "The Delphi Method: Techniques and Applications". (<http://is.njit.edu/pubs/delphibook/index.html>).

LONG, J. A., NELSON T. A., Y WULDER M. A. (2010). "Regionalization of landscape pattern indices using multivariate cluster analysis". *Environmental Management*, N°46 (1), pp. 134-142.

MALCZEWSKI, J. (2000). "On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches". *Transactions in GIS*, N°4 (1), pp. 5-22.

MALCZEWSKI, J. (2006). "GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature". *International Journal of Geographical Information Science*, N°20 (7), pp. 703-726.

MEADEN, G.J. (1987). Where should trout farms be in Britain?. *Fish Farmer*, pp. 33-35.

MEADEN, G.J. Y KAPETSKY, J.M. (1991). "Geographical information systems and remote sensing in inland fisheries and aquaculture". *Fisheries Technical Paper N°318*. Rome, FAO.

MÉNDEZ, R. (2006): "Políticas de promoción y ordenación industrial en las áreas urbanas". En: Méndez Gutiérrez del Valle, R. y Pascual Ruiz-Valdepeñas, H. (coords.): *Industria y ciudad en España: nuevas realidades, nuevos retos*, Cizur Menor (Navarra), Cívitas, pp. 51-74.

MORAN, P. (1950). "Notes on Continuous Stochastic Phenomena". *Biometrika*, N°37, pp. 17-33.

MGAP. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (1994). "Unidades de suelos Coneat. MGAP-DGRNAR-CONCAT". MGAP-Montevideo. pp.182.

MORENO, A. (2007). "Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS". Madrid, pp. 940.

NATH, S.S., BOLTE, J.P., ROSS, L.G. Y AGUILAR-MANJÁRREZ, J. (2000). "Applications of geographical information systems (GIS) for spatial decision support in aquaculture". *Aquacultural Engineering*, N°23, pp. 233-278.

NAYAK, A. K., PANT, D., KUMAR, P., MAHANTA, P.C., Y PANDEY, N.N. (2014). "GIS-based aquaculture site suitability study using multi-criteria evaluation approach". *Indian Journal of Fisheries*, N°61(1), pp. 108- 112.

PALOMBO, M. E. B. (2015). "Los instrumentos de planificación territorial". *Revista Urbano*, N°4(5), pp. 71-76.

PETERSON, G. D., CUMMING G.S. Y CARPENTER. S.R. (2003). "Scenario planning: a tool for conservation in an uncertain world". *Conservation Biology*, N°17: 358-366.

R CORE TEAM. (2015). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

RADIARTA, I.N., SAITOH, S., Y MIYAZONO, A. (2008). "GIS-based multi-criteria evaluation models for identifying suitable sites for Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) aquaculture in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan". *Aquaculture*, N°284, pp. 127-135.

SAATY T.L (1980). "The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation". McGraw-Hill Inc., New York, pp.287.

SAATY T.L. (1994). "How to make decision: the analytic hierarchy process". *Interfaces*, N°24(6), pp. 19-43.

SANTÉ, I. Y CRECENTE, R. (2005). "Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales". *GeoFocus*, N°5, pp 40-68.

SHENG, T.C. (1992). "Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Estudio y planificación de cuencas hidrográficas". *Guía FAO Conservación*. N°13(6), pp. 179.