



TESINA PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIADA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

Modelos de optimización y multiatributo para la asignación de usos del suelo en la cuenca de la Laguna de Rocha

Antonella Barletta Torre

*Orientadora: Carolina Cabrera Di Piramo,
Facultad de Ciencias, Universidad de la República*

*Co-Orientador: Antonio Mauttone,
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República*

setiembre 2017

Resumen

La coexistencia en un mismo territorio de distintos usos del suelo genera presiones y conflictos de intereses. Una de las consecuencias de los conflictos ambientales más destacadas en el Uruguay y en el mundo, está asociada al aumento de nutrientes en cuerpos acuáticos y los eventuales surgimientos de floraciones de algas con disminución de la calidad del agua y potencial liberación de toxinas peligrosas para la salud humana. Tanto las presiones con sus consecuencias ambientales, como los conflictos de intereses en el territorio, influyen y por lo tanto deben ser tenidos en cuenta a la hora de generar políticas de ordenamiento territorial y de gestión ambiental.

Para trabajar sobre estos conflictos de intereses se requieren métodos que puedan ser utilizados por el conjunto de actores cumpliendo un papel en la toma de decisiones sobre el territorio. La aplicación de modelos matemáticos y computacionales en esta área específica (optimización de usos del suelo) para colaborar con la toma de decisiones se ha incrementado sustancialmente en la última década. En este trabajo se estudia un problema de ordenamiento territorial para el cual se aplican modelos computacionales de optimización. En particular, se consideran modelos de optimización con múltiples objetivos enfocados en aumentar la aptitud de los usos del suelo y minimizar el aporte de fósforo a la Laguna de Rocha, de manera de evitar el deterioro de la calidad del agua. Los resultados se visualizan a través de un sistema de información geográfica para facilitar su interpretación.

Se aplican dos metodologías de resolución diferentes para el modelo de optimización y se verifican las hipótesis formuladas ya que son los valores de aptitud y de exportación de fósforo los que determinan las distintas configuraciones espaciales de los usos del suelo. Si se le da mayor importancia a disminuir el aporte de fósforo, el modelo selecciona en mayor cantidad los usos del suelo con menor exportación (como ganadería/conservación). Cuando se le da más importancia a incrementar la aptitud de los suelos, los usos con mayor aptitud (como agricultura) son seleccionados. Para el caso de la aforestación, el modelo asigna siempre el valor máximo de unidades espaciales aptos para dicho uso del suelo. Al combinar los resultados de ambas metodologías, se obtiene un espectro de soluciones amplio en el rango de compromisos entre los objetivos en conflicto. La aplicación del modelo de optimización es exitosa en generar respuestas diversas con la potencialidad de ser tenidas en cuenta en un proceso de planificación territorial.

Palabras clave:

Laguna de Rocha - optimización multiobjetivo - ordenamiento territorial

Agradecimientos:

Primero que nada quiero agradecerle sinceramente a mis tutores Carolina y Antonio, por la disposición continua a resolver problemas, contestar dudas, reuniones en localidades diversas y más dudas. Sin ellos, obviamente, esto no habría sido posible, gracias.

Cabe agradecer también a todas las personas que colaboraron en el trabajo en este territorio recabando información clave para el desarrollo de este trabajo. Un agradecimiento especial a Paula por su trabajo en el componente de desarrollo informático y a Lorena por su trabajo y su apoyo. Agradezco asimismo al tribunal por el tiempo empleado y las sugerencias dadas.

Finalmente agradezco a mi centro de estudiantes, que me enseñó lo que importa de la ciencia.

A todos los demás, los que importan, no necesito estas hojas para agradecerles.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Eutrofización	1
1.2. Manejo y ordenamiento territorial	3
1.3. Herramientas computacionales para el ordenamiento territorial	4
1.4. Modelos de optimización	5
1.5. Antecedentes de interés	7
2. Hipótesis y predicciones	10
3. Objetivos	11
3.1. Objetivo general	11
3.2. Objetivos específicos	11
4. Metodología	12
4.1. Descripción del problema	12
4.2. Área de estudio	12
4.3. Abordaje del problema	13
4.3.1. Usos y coberturas del suelo y exportación de fósforo .	13
4.3.2. Aptitud del suelo para diferentes actividades humanas	13
4.3.3. Optimización	14
4.4. Formulación matemática	15
5. Resultados	18
5.1. Situación actual en la Laguna de Rocha y parámetros de mo- delos	18
5.2. Modelo de optimización	21
5.2.1. Método de resolución de suma ponderada	21
5.2.2. Método de resolución ε -restricción	24
5.2.3. Combinación de salidas para ambos métodos de re- solución	25

6. Discusión	27
6.1. Situación de partida	27
6.2. Modelo de optimización	28
6.2.1. Conflictos de intereses en la metodología suma ponderada	30
6.2.2. Resultados método ε -restricción	30
7. Conclusiones y perspectivas	31
Referencias	33

1. Introducción

En 1987 la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, presentó un informe titulado “Nuestro futuro común” en el que aparece por vez primera el término *Desarrollo Sostenible*, definido como aquel desarrollo que “satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones” (Brundtland & Khalid, 1987).

Relacionado a ello, en las últimas décadas a nivel global se ha detectado un fuerte incremento en la extracción y el uso de recursos naturales en los distintos ambientes, lo que podría generar presiones a nivel social, cultural, económico y ecológico. Estas presiones por tanto comprometerían el abastecimiento de diferentes bienes y servicios de las generaciones futuras, comprometiendo la sostenibilidad del sistema (Lovell & Johnston, 2009; O’Farrell & Anderson, 2010).

Las distintas presiones se relacionan -en parte- con el hecho de que en un mismo territorio coincidan diferentes tipos de usos del suelo, pudiendo derivar en la aparición de conflictos. Estos aparecen ya que un mismo sitio puede pretender ser utilizado para varias actividades, sobre las que coexisten distintos intereses económicos, sociales y ambientales entre otros. Estos posibles conflictos pueden influenciar el diseño de políticas de ordenamiento territorial y gestión de los ambientes afectados (Rodríguez-Gallego et al., 2012). Si en el proceso de planeamiento territorial los posibles conflictos de intereses entre los diversos actores involucrados se identifican tarde, es posible que no se encuentre solución a todos los problemas o conflictos (Potschin et al., 2010).

Los abordajes tradicionales de los grandes problemas, reduccionistas y fraccionados, se muestran poco eficientes para objetivos sustentables, requiriendo visiones holísticas, integrando disciplinas para entender las consecuencias y para proyectar soluciones (Potschin et al., 2010; Huang et al., 2011). En el sentido de lo dicho anteriormente, es necesario abordar los territorios como paisajes multifuncionales, satisfaciendo las necesidades para el crecimiento económico, así como manteniendo los valores culturales intrínsecos, junto a las funciones ambientales y los servicios ecológicos que brindan estos sistemas sustentando a la sociedad (Lovell & Johnston, 2009).

1.1. Eutrofización

A nivel global a partir de la década de los 60 del siglo XX, distintos grupos de investigadores comienzan a vincular el deterioro de la calidad del agua

con el exceso de nutrientes, especialmente el fósforo, provenientes de actividades humanas en las cuencas de drenaje (Schindler, 2006). En Uruguay se ha evidenciado una intensificación de los usos productivos del suelo, con énfasis en el sector agropecuario y esto produce consecuencias a nivel de las cuencas.

Uno de los impactos más evidentes de dicha intensificación es la eutrofización (Rodríguez-Gallego et al., 2012), y el aumento de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo han sido identificados como una de las principales causas de este fenómeno (Haakonsson et al., 2017). Estas condiciones ambientales pueden generar incremento brusco y de valores significativos de la biomasa de cianobacterias y algas eucariotas del fitoplancton, fenómeno conocido como floración o *bloom* en inglés (Haakonsson et al., 2017; Smayda, 1997). Este fenómeno genera problemas ambientales como la disminución de la calidad del agua, la pérdida de servicios ecosistémicos, entre otros. A la vez, las cianobacterias producen metabolitos secundarios, algunos de los cuales pueden ser tóxicos y afectar tanto a organismos acuáticos como terrestres, incluyendo al hombre (Leflaive & Ten-Hage, 2007). Algunas especies productoras de toxinas han sido recientemente detectadas en distintos ambientes acuáticos de Uruguay, incluidas las lagunas costeras entre las que se encuentra la Laguna de Rocha (Haakonsson et al., 2017).

El fósforo es un elemento limitante para el crecimiento del fitoplancton (Rigler, 1956; Aubriot, 2008; Haakonsson et al., 2017). En la Laguna de Rocha se han realizado trabajos para determinar las concentraciones de fósforo que promueven el crecimiento de cianobacterias (Cabrera, 2015), siendo esta la razón por la que se eligió trabajar con este nutriente. La incorporación del nutriente en un nivel superior puede ser un factor que derive en el crecimiento del fitoplancton y en la aparición de floraciones y por lo tanto afecten la calidad del agua (Falkner et al., 1989; Rigler, 1956).

Estos motivos hacen que sea importante que los esfuerzos de gestión se focalicen en el control del fósforo. Para que la gestión sea efectiva se necesita un enfoque integrando diversos factores, incluida la protección y la restauración de los componentes bióticos y abióticos, no solamente en los propios ecosistemas sino también en las cuencas (Schindler, 2006).

Si se desea estudiar el alcance de los problemas en la calidad del agua con un abordaje integrado, una planificación detallada es necesaria para garantizar un uso sustentable de los recursos naturales (Chang et al., 1995). Por estos motivos es que trabajos que integren la exportación de fósforo en relación con las actividades humanas necesarias para el bienestar son importantes en miras de un planeamiento territorial multifuncional y sustentable.

1.2. Manejo y ordenamiento territorial

Cuando se trabaja con decisiones ambientales, los niveles de incertidumbre suelen ser muy altos, hay decisiones potencialmente irreversibles y se cuenta con muchos actores involucrados directa e indirectamente en los procesos de toma de decisión con, a su vez, múltiples objetivos y valoraciones (Gough & Ward, 1996). Por todo ello la información, enfoque y metodologías de soporte en estos procesos son de vital importancia. El buen uso de bases de datos y metodologías disponibles mejora la transparencia de los procesos de gestión enfocados en los impactos ambientales y en los costos de las distintas actividades y beneficios económicos para la sociedad, aunque algunos de los parámetros u opiniones usados no sean fácilmente cuantificables (Chang et al., 1995).

Para una visión integral enfocada en ajustar e innovar un paisaje de naturaleza compleja y con diferentes valoraciones, las posiciones de los actores sociales, las distintas disciplinas involucradas y una visión enfocada en varias escalas espaciales son indispensables (Groot et al., 2007). La complejidad en planificación de usos del suelo e interacciones de los grupos involucrados requiere el apoyo de metodologías y modelos para dialogar con los actores, inversores, propietarios de las tierras y demás gestores, con el objetivo de diseñar alternativas y explorar escenarios futuros (Groot et al., 2007).

En un mismo territorio pueden coincidir varios usos del suelo posibles, lo que puede llevar a la aparición de conflictos de intereses. Estos surgen de las diversas naturalezas de las actividades potenciales que pueden ser económicas, sociales, ambientales entre otras. Estos conflictos pueden influenciar el diseño de políticas de ordenamiento territorial y gestión de los ambientes afectados (Rodríguez-Gallego et al., 2012).

Los conflictos de intereses se pueden acentuar por la falta de métodos estandarizados de ordenamiento territorial aplicables a distintos sistemas, de sencilla aplicación e interpretación, que permitan su utilización por personal no científico (Malczewski, 2006). Una metodología que puede cumplir estas características es la optimización, que tiene la potencialidad de ser usada como apoyo a la toma de decisiones. Esto es así ya que permite encontrar la mejor decisión (combinación de decisiones puntuales sobre muchas unidades que representan componentes interdependientes del sistema), maximizando o minimizando uno o varios criterios cuantificables sujetos a ciertas restricciones. Por otro lado, para un correcto abordaje integral del problema de la eutrofización y la vinculación con los cambios de usos del suelo, son necesarias extensas bases de datos temporales de los sitios de estudio (O'Farrell & Anderson, 2010). La Laguna de Rocha cuenta con extensos y diversos estudios ecológicos y de calidad del agua así como estudios sobre los cambios en los usos del suelo (Lagos et al., 2011). En el 2010 la Laguna

de Rocha pasa a ser considerada dentro del SNAP como Paisaje Protegido, lo que implica un compromiso nacional con el desarrollo sustentable del territorio sin desmedro de la conservación del paisaje. Es en este sentido que se vuelve de gran importancia aportar estrategias valiosas e investigaciones realizadas en el área que generan conocimientos aplicables para la gestión (MVOTMA, 2016).

1.3. Herramientas computacionales para el ordenamiento territorial

Para enfrentar los crecientes desafíos del desarrollo sostenible, entre los que se encuentran las consecuencias vinculadas a la eutrofización de los ambientes acuáticos, en los últimos años distintos grupos de científicos han trabajado en la generación de herramientas computacionales. Estas se han adaptado a las distintas necesidades de los usuarios, mostrando una inmensa variedad de funciones. A través de algunos de estos diversos enfoques y herramientas se busca, desde distintas disciplinas, evaluar tanto el estado actual a nivel ambiental, así como las consecuencias de las acciones desarrolladas para enfrentar estos desafíos. Esto se hace con la intención de proponer acciones para minimizar o evitar impactos a nivel ambiental ya sea de contaminación, conservación de la biodiversidad u ordenamiento del territorio, en las dimensiones que se consideran valiosas para la humanidad (Potschin et al., 2010).

Las herramientas computacionales ocupan un espacio de creciente importancia en los campos relacionados al planeamiento territorial, donde los distintos actores responsables de la toma de decisión deben tener en consideración las muy diversas relaciones entre los sistemas ecológicos, sociales, políticos y éticos (Chang et al., 1995; Huang et al., 2011; Potschin et al., 2010). A la vez, los tomadores de decisión tampoco pueden ignorar el hecho de que los distintos grupos de interesados pueden tener, y muy a menudo tendrán, diferentes opiniones sobre qué acciones son adecuadas, accesibles y valiosas para un mismo territorio (Potschin et al., 2010). Muchas de estas herramientas son especialmente diseñadas para colaborar en los procesos de toma de decisión del ordenamiento territorial involucrando los compromisos y propósitos específicos a cada contexto. Tal es el caso de este y previos trabajos en el área en los cuales se utilizaron para modelización computacional y para la visualización (SIG) de resultados y variables (Cabrera, 2015; Haakonsson et al., 2017; Nin, 2013; Rodríguez-Gallego et al., 2012).

Los procesos de toma de decisión para el ordenamiento territorial deben incluir un foco en la escala espacial en que trabajan los modelos computacionales (Groot et al., 2007). La toma de decisiones, en muchas ocasiones,

no se puede tomar libremente en grandes áreas del territorio, por lo que trabajar también en pequeñas escalas se convierte en una necesidad a la hora de gestionar un ambiente que puede tener innumerables propietarios.

La naturaleza de los problemas de toma de decisión es, por lo tanto, conceptualmente compleja. Son problemas con un gran nivel de incertidumbre por lo que deben ser simplificados, antes siquiera de que se empiecen a buscar soluciones (Moilanen, 2008). Para problemas de esta naturaleza, las herramientas computacionales aportan múltiples beneficios ya que permiten entre otras cosas realizar un alto número de cálculos en tiempos cada vez menores. A su vez, contribuyen al procesamiento, adquisición, mantenimiento y comunicación de gran cantidad de información, además de permitir visualizar y comunicar información de variada naturaleza. Por otro lado, las herramientas computacionales posibilitan llevar a la práctica la optimización, como se verá en este trabajo.

1.4. Modelos de optimización

La optimización se trata del proceso de selección de la mejor opción: maximizar o minimizar alguna medida que representa un criterio de eficiencia, costo, bondad, etc, y que depende de variables que pueden tomar valores en un conjunto definido por diferentes restricciones. Los modelos de optimización son usualmente expresados mediante formulaciones matemáticas y resueltos por programas computacionales que incluyen algoritmos de resolución (Yang, 2010). Un algoritmo se puede definir como una secuencia finita de instrucciones que poseen un significado preciso y pueden ejecutarse con una cantidad finita de esfuerzo en un tiempo finito (Aho et al., 1988). En la resolución de un modelo de optimización, no siempre se puede llegar a la mejor solución en un tiempo razonable y práctico. El objetivo del desarrollo de algoritmos de resolución para modelos de optimización es encontrar el método más eficaz (aquel que encuentra el óptimo o algo cercano al mismo) y eficiente (lo hace rápido, en términos de tiempo computacional) para una tarea de optimización dada.

Los problemas de optimización se pueden formular matemáticamente, en base a un conjunto de parámetros (valores fijos, exógenos al problema), un conjunto de variables de decisión (sobre las cuales el decisor tiene influencia y para las cuales busca encontrar los mejores valores), con al menos una función objetivo y con las funciones de restricción pertinentes. La complejidad de resolución de estos problemas depende en gran medida de las formas de las funciones objetivo y de las restricciones que se establezcan (Yang, 2010), así como de la naturaleza de las variables de decisión. Se entiende por función objetivo cualquier expresión matemática que se busca maximizar o minimizar y está expresada en términos de parámetros y variables. Las variables se definen a su vez, como un valor numérico pertinen-

te para un modelo, cuyos valores se determinan a través de optimización. Finalmente las restricciones son entendidas como una igualdad o desigualdad expresada en términos de parámetros y variables y que usan el mismo tipo de expresión que los objetivos (Fourer et al., 1987).

Un tipo particular de optimización es la lineal, donde todas las restricciones y objetivos son funciones lineales de las variables, que resulta en modelos fáciles de resolver en términos computacionales. Otro tipo de optimización es la multiobjetivo, donde existen diferentes funciones objetivo en conflicto, lo que implica que una mejora en el nivel de una función se logra solamente con un detrimento en el nivel de otra (u otras). Un problema de optimización multiobjetivo tiene muchas soluciones (denominadas eficientes o de Pareto) que representan diferentes grados de compromiso entre los objetivos en conflicto (Ehrgott, 2006). También hay problemas de optimización lineal multiobjetivo (Yang, 2010). Los problemas de optimización multiobjetivo se aplican principalmente en ámbitos públicos y privados, en problemas de ingeniería y planificación de recursos. La optimización multiobjetivo puede brindar un análisis de los objetivos en conflicto, teniendo en cuenta los compromisos posibles entre entidades que toman decisiones sobre un mismo dominio pero con intereses antagónicos (Lee & Choi, 1996).

El tiempo de cómputo requerido para encontrar una solución óptima puede, para algunos problemas de optimización, no ser manejable. En el caso de algunos problemas de optimización se debe recurrir a heurísticas, que son métodos de resolución que no garantizan optimalidad, pero sí se ejecutan en tiempos computacionales manejables (Ehrgott & Gandibleux, 2000). Además no requieren una formulación matemática explícita, característica que puede ser deseable en problemas difíciles de formular en términos matemáticos.

En la literatura (Lee & Choi, 1996) se identifican dos principales métodos exactos de resolución para problemas de optimización multiobjetivo: el método de suma ponderada y el método ε - restringido. El primero trabaja ponderando los objetivos entre sí, mientras que el segundo transforma objetivos en restricciones hasta quedar solo con uno (Ehrgott, 2006). Por otro lado, los enfoques de resolución pueden ser clasificados de acuerdo al rol que ocupan los tomadores de decisión en el proceso de resolución, pudiendo ser enfoques *a priori*, cuando las preferencias se conocen desde el inicio del proceso de toma de decisión, tal es el caso de los dos métodos previamente mencionados; *a posteriori*, donde se genera el conjunto completo de soluciones para el problema en concreto que luego serán analizados por los tomadores de decisión y finalmente el modo *interactivo*, donde las preferencias son ingresadas durante el proceso. Como alternativa a los métodos exactos se ubican los métodos aproximados, que compensan la calidad de una aproximación al conjunto de soluciones con el tiempo y la memoria requerida. Los métodos aproximados abordan la complejidad de

los problemas simplificándolos en menor medida que los métodos exactos; ambas aproximaciones pueden alejarse de las soluciones óptimas en distintos puntos, los métodos exactos en el momento de la simplificación y los aproximados en la resolución (Moilanen, 2008). Dentro de los métodos aproximados estos se ubican los métodos de búsqueda local y los métodos basados en poblaciones (Ehrgott & Gandibleux, 2000).

Los problemas multiobjetivo tienen un conjunto de soluciones óptimas alternativas que revelan las sinergias o compromisos entre las distintas funciones objetivo que pueden ser parcialmente contradictorias (Groot & Rossing, 2011). Esto puede ser útil en un proceso de toma de decisión, dando confianza y transparencia y por lo tanto mayor aceptación de la metodología por los actores involucrados. Queda a criterio de los tomadores de decisión elegir cuál de estas es la mejor opción (Langemeyer et al., 2016).

Las herramientas de visualización, que pueden ser operadas por y con actores clave en la toma de decisión, apoyan el proceso de aprendizaje y de negociación (Groot & Rossing, 2011). Los modelos de optimización se pueden combinar con Sistemas de Información Geográfica (SIG), que están entre las herramientas computacionales de visualización espacial más usadas en objetivos de conservación y planificación territorial (Baldwin et al., 2014). Esta combinación puede ayudar a los tomadores de decisión a evaluar los impactos en el marco de un sistema de soporte de decisión (Chang et al., 1995).

1.5. Antecedentes de interés

Los procesos de manejo adaptativo de los recursos naturales suelen dividirse en pasos que se pueden resumir en los siguientes: delimitación del problema con una caracterización profunda del paisaje, análisis de la situación actual del sistema, exploración de alternativas, rediseño a partir de la alternativa más deseable y finalmente implementación de esta alternativa con sus planes de monitoreo (Groot & Rossing, 2011). La Laguna de Rocha, como ejemplo de dichos procesos, presentó una extensa y profunda investigación del grupo de Limnología de Facultad de Ciencias desde la década de 1970 (junto con otros grupos como Oceanografía, Unidad de Ciencias del Mar, entre otros), comenzando con proyectos meramente descriptivos del ecosistema para que finalmente, a partir de la década de 1990, se empiecen a desarrollar proyectos de investigación enfocados en estudios interdisciplinarios que integran las actividades humanas (Lagos et al., 2011). Es necesario profundizar en los pasos siguientes referidos a explorar y posteriormente rediseñar alternativas de manejo de los recursos en la Laguna de Rocha.

A su vez, a nivel de las lagunas costeras de Uruguay se han realizado modelos multiatributo para analizar los conflictos de usos del suelo actuales y

potenciales. Se usaron las opiniones de expertos en distintos usos del suelo: agricultura, conservación, ganadería, turismo y aforestación; para hallar aptitudes de los suelos para cada uso (Rodríguez-Gallego et al., 2012; Verrastro, 2015). La aptitud de los suelos se define como la adecuación de un área particular para un uso específico en relación con las necesidades (Bojórquez-Tapia et al., 1994). Los usos del suelo fueron caracterizados desde una imagen satelital (Nin, 2013). Los resultados (Rodríguez-Gallego et al., 2012) mostraron una tendencia a un aumento de los conflictos desde los existentes entre los usos del suelo actuales a los potenciales considerando las aptitudes resultantes del modelo multiatributo. Se encontró que los conflictos eran mayores para la conservación y la agricultura (Rodríguez-Gallego et al., 2012). Se realizaron trabajos en la zona usando también la opinión de expertos para la realización de modelos multicriterio espaciales enfocados en los servicios ecosistémicos que pueden ser proveídos por paisajes multifuncionales (Nin et al., 2016).

Se han realizado modelos hidrológicos acoplados a modelos de calidad de agua con el objetivo de encontrar el umbral de concentración de fósforo suficiente para promover el crecimiento de cianobacterias en la Laguna de Rocha (Cabrera, 2015). También se aplicaron modelos de optimización lineal de un solo objetivo en la Laguna de Rocha, para determinar la superficie máxima permitida en actividades productivas y la configuración espacial óptima de todos los usos del suelo en la cuenca, que mantenga la concentración de fósforo disponible en el cuerpo de agua por debajo del umbral que promueve el crecimiento de fitoplancton potencialmente nocivo (Cabrera, 2015; Rodríguez-Gallego & Soutullo, 2013). En estos modelos la aptitud del suelo para los distintos usos se definió, para el caso de la agricultura, según el índice de CONEAT en 3 niveles (0 = suelo no apto, 1 = suelo con aptitud media, 2 = suelo con aptitud alta), para el caso de la aforestación se usó la prioridad forestal según el Decreto Número 191 del 2006 en 2 niveles (0 = no prioritario, 1 = prioritario) y para el caso de ganadería / conservación el valor de aptitud era 1 para todos los píxeles que entraban al modelo. Este modelo usaba criterios espaciales explícitos dividiendo la cuenca de la Laguna de Rocha en una grilla formada por píxeles de media hectárea. Se encontró que, dependiendo del grado de superación del umbral de fósforo que se puede aportar al sistema, el modelo respondía asignando todo el territorio a ganadería / conservación, o en casos de umbral superior a agricultura; concluyendo que un aumento del uso agrícola en la cuenca de la Laguna de Rocha podría favorecer el crecimiento de cianobacterias. Este modelo tenía como limitación la sobre-asignación de algunos usos como la agricultura sobre otros como la aforestación debido a la forma de asignación de la aptitud (Cabrera, 2015).

No existen, sin embargo, antecedentes que conjuguen modelos de optimización de usos del suelo que sean espacialmente explícitos y que utilicen valores realistas de aptitud de los suelos para las distintas actividades pro-

ductivas que hayan sido obtenidos modelando la opinión de expertos. En este trabajo se realiza esta conjugación, buscando explorar las capacidades del modelo a través de la múltiple experimentación.

2. Hipótesis y predicciones

Hipótesis general Distintos valores de aptitud y coeficientes de exportación de nutrientes de los usos del suelo, determinarán distintas configuraciones espaciales de estos usos en la cuenca para maximizar la aptitud y minimizar la exportación de fósforo.

Predicción general Cuando se prioriza el criterio de minimizar la exportación de nutrientes, se espera encontrar mayor cobertura de los usos con coeficientes de exportación de fósforo menores, y cuando se prioriza el criterio de maximizar la aptitud de usos del suelo, se espera encontrar mayor cobertura de los usos con mayores valores de aptitud.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Experimentar con un modelo de optimización de usos del suelo en la cuenca de la Laguna de Rocha que maximice la aptitud de los usos productivos a la vez que minimice el aporte de nutrientes de la cuenca e incluya valores de aptitud obtenidos a través de un modelo multiatributo.

3.2. Objetivos específicos

1. Aplicar un modelo de optimización lineal multiobjetivo (Cabrera, 2015) resolviéndolo con la metodología de suma ponderada, incluyendo los valores de aptitud modelados por Rodríguez-Gallego et al. (2012).
2. Aplicar un modelo de optimización lineal multiobjetivo (Cabrera, 2015) resolviéndolo con la metodología de ε -restricción, incluyendo valores de aptitud modelados por Rodríguez-Gallego et al. (2012).
3. Analizar los compromisos presentes en cada etapa del estudio: entre las aptitudes para distintos usos del suelo, entre aptitudes y usos del suelos actuales y entre aptitudes y usos del suelo resultantes del modelo.
4. Comparar entre sí los resultados obtenidos a partir de las dos metodologías de resolución.

4. Metodología

4.1. Descripción del problema

Para trabajar sobre los conflictos ambientales relacionados a los usos del suelo, existe una tendencia internacional a recurrir a modelos computacionales, en particular aquellos relacionados con optimización y que son espacialmente explícitos (Chang et al., 1995). En la última década se han publicado múltiples trabajos en el campo de la optimización enfocados en problemáticas ambientales (Groot & Rossing, 2011).

En el caso de este trabajo, se buscó seleccionar las actividades con mayor aptitud en la cuenca, a la vez que disminuir la exportación de fósforo a la Laguna de Rocha, ya que potencialmente esto podría causar diversas problemáticas ambientales (Reynolds, 1984). Este trabajo consistió en incluir aptitudes previamente obtenidas a través de un modelo multiatributo (Rodríguez-Gallego et al., 2012), en una optimización lineal que tuvo por objetivo disminuir el fósforo exportado a la Laguna de Rocha a la vez que aumentar la superficie de los usos productivos más intensivos en los suelos más aptos (Cabrera, 2015).

Para el diseño del experimento se planteó un problema de optimización, posteriormente se utilizaron dos metodologías diferentes de resolución: primero la metodología de suma ponderada en la cual se varía el peso relativo de los diferentes objetivos de la optimización (en este caso maximizar la aptitud en los suelos y minimizar la exportación de fósforo). La segunda metodología es ϵ -restricción que posee un solo objetivo y el resto es transformado en restricciones. Finalmente se comparan los resultados de ambas metodologías.

4.2. Área de estudio

La Laguna de Rocha es una laguna costera ubicada en el este de Uruguay, comunicada con el Océano Atlántico mediante una barra arenosa que se abre tanto natural como artificialmente varias veces al año. Posee una profundidad media de 0,6 m, una superficie de espejo de agua de 72 km² y de cuenca de 1.312 km² (Aubriot et al., 2005; Haakonsson et al., 2017). Está incluida en la reserva de biósfera "Bañados del Este" (MaB UNESCO), pertenece al Sistema Nacional de Áreas Protegidas y fue recientemente declarado sitio RAMSAR en Uruguay, dando cuenta del valor intrínseco del sistema y su énfasis en la conservación de la biodiversidad (Rodríguez-Gallego et al., 2008).

4.3. Abordaje del problema

4.3.1. Usos y coberturas del suelo y exportación de fósforo

La superficie de la cuenca de la Laguna de Rocha fue dividida previamente (Cabrera, 2015) en una grilla formada por píxeles de media hectárea, sumando un total de 222.471 píxeles. A estos píxeles se les asignó el uso del suelo (actividad productiva: aforestación, agricultura o ganadería / conservación) o cobertura del suelo (formación vegetal: arenales o dunas, bosques nativos, buffer arroyo, pastizales y humedales) mayoritaria según la interpretación de una imagen satelital del año 2011 (Nin, 2013). A su vez cada uso del suelo o cobertura tiene coeficientes de exportación específicos para cada uno tomados de la bibliografía (Tabla 1) (Rodríguez-Gallego et al., 2012).

De las coberturas y usos del suelo actuales, se consideraron varios como incambiables ya sea por motivos conservacionales, como los bosques nativos y arenales, así como por la imposibilidad del suelo de cumplir otra función de forma inmediata como pueden ser los suelos forestados. Aquellos que sí pueden modificarse, unos 95.939 píxeles, formaron parte de las variables de decisión del modelo de optimización (Tabla 1). Todos los píxeles de la cuenca, tanto los que entran al modelo de optimización, como los que no, aportan fósforo a la Laguna de Rocha, medida que fue tomada en cuenta para el cálculo de la exportación de fósforo final; los valores de exportación de fósforo de cada uso y cobertura del suelo están expresados en la Tabla 1.

4.3.2. Aptitud del suelo para diferentes actividades humanas

A cada píxel se le asignó una aptitud para los distintos usos del suelo, un valor que describe qué tan adecuado es para el uso del suelo dado. Estas aptitudes fueron previamente calculadas a través de un modelo multiatributo que describía las condiciones de los suelos para las distintas actividades. Las condiciones de los suelos fueron definidas en base a la opinión de expertos en los distintos usos del suelo y se transformaron en valores entre 0 y 1 que fueron utilizados posteriormente en el modelo multiatributo. Para el caso de la aforestación se utilizaron los valores de prioridad de suelos definidos por CONEAT para dicho uso del suelo (Rodríguez-Gallego et al., 2012).

En el caso de las actividades agricultura, ganadería / conservación la aptitud tomó valores reales en el intervalo cerrado $[0,1]$; si el valor es 0 se excluyó dicho uso del suelo en el píxel. Para el caso de ganadería / conservación el valor final es resultado de un promedio generado a partir de la opinión de expertos por distintas propiedades del suelo que lo hacen más

apto para la ganadería. En el caso de aforestación la aptitud es 1 cuando el suelo es apto para esta actividad y 0 cuando no lo es. El uso conservación incluye a ganadería, ya que se consideró que dada la modalidad de ganadería extensiva, mayoritaria del país y de la zona, no es una actividad incompatible con la conservación de la biodiversidad.

Tabla 1: Coberturas y usos del suelo asignadas según una imagen satelital del 2011 (Nin, 2013) con su correspondiente coeficiente de exportación (KgP/ha/año). Se indica además el uso del suelo que puede asignarle a cada píxel la optimización (A: agricultura, F: aforestación, G+C: ganadería / conservación, N/A: no cambia o no aplica) y los valores de aptitud que puede tener asignado

Coberturas y usos del suelo en 2011	Coeficiente de exportación P (KgP/ha/año)	uso del suelo que puede adquirir con la optimización	Valor que puede tomar la aptitud del suelo para cada uso
Arenales o dunas	0,01	N/A	N/A
Bosque nativo	0,01	N/A	N/A
Buffer arroyo	0,01	N/A	N/A
Pastizales y humedales	0,01	N/A	N/A
Campo/ (G+C)	0,24	A, F, G+C	[0,1]
Aforestación	0,29	A, F, G+C	0 ó 1
Agricultura	2,60	F	[0,1]

4.3.3. Optimización

Con los valores de aptitud de los distintos píxeles y la exportación de fósforo de los usos del suelo, se realizó un modelo de optimización lineal entera multiobjetivo, en este caso de dos objetivos, que fue abordado a través de dos metodologías distintas de resolución (Ehrgott, 2006). Los dos objetivos fueron: maximizar la aptitud total de los usos del suelo en la cuenca (esto es que la suma de las aptitudes del uso del suelo asignado sea máxima) y minimizar la exportación de fósforo a la laguna.

La primera metodología de resolución de optimización usada fue la suma ponderada, que consiste en agregar en una única función los dos objetivos ponderados por un parámetro. El parámetro ponderador, mediante la asignación de diferentes valores, refleja la importancia relativa asignada a cada objetivo, pudiendo tener así un conjunto de soluciones que representan diferentes niveles de compromiso entre los objetivos en conflicto.

La segunda metodología fue ε -restricción, la cual consta de un sólo objetivo para maximizar las aptitudes, mientras el otro objetivo es transformado en una restricción: la cantidad máxima de fósforo que se puede exportar desde la cuenca a la Laguna de Rocha, que es limitada por un valor ε . Variando este valor se obtienen los diferentes compromisos, tal como se logra al variar el ponderador en la metodología de la suma ponderada.

Ambas metodologías fueron implementadas en lenguaje AMPL y ejecutadas en el programa CPLEX (2017), utilizando la infraestructura del Instituto de Computación (InCo) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República que posee la licencia académica. Para eso se utilizaron programas elaborados por un equipo del InCo para transformar la información proveniente del SIG a códigos legibles por CPLEX. Los resultados del modelo fueron transformados a un formato SIG y se utilizó el programa de libre acceso QGIS (2016) para la interpretación geográfica expresando los mapas resultantes con las distribuciones de usos del suelo óptimas en cada caso.

Finalmente se interpretaron los mapas con la cantidad de píxeles asignados a los distintos usos del suelo y los posibles conflictos que podrían haber entre ellos y en relación con las aptitudes, la producción y la conservación de la biodiversidad de los mismos píxeles.

4.4. Formulación matemática

Conjuntos:

Conjunto I : píxeles, son unidades de media hectárea en que se divide el suelo de la cuenca de la Laguna de Rocha, expresado como $i=1, 2, \dots, 95.939$.

Conjunto J : usos del suelo, hace referencia a la característica de cada píxel de la cuenca, definido como $j= 1, 2, 3$ y representando los usos del suelo (A, F y G+C) respectivamente.

Parámetros:

Coefficiente de exportación para el uso j : c_j , expresa cuánto fósforo se exporta por unidad de superficie con la cobertura, propiedad o uso del suelo asignada (Tabla 1)

Función de usos: $u_{ij} \in [0, 1]$ indica el nivel de aptitud del píxel i para realizar la actividad j

Área del píxel i : s_i

Variables de decisión:

Píxeles interviniendo en el proceso de optimización, a los que el modelo les asignará un uso del suelo:

$x_{ij} \in \{0, 1\}$ donde

- $x_{ij} = 1$ si se realiza la actividad j en el píxel i
- $x_{ij} = 0$ si no se realiza la actividad j en el píxel i

Objetivos:

-Minimizar la exportación de fósforo

$$\min_x f_1 = \sum_i \sum_j x_{ij} c_j s_i \quad (1)$$

-Maximizar el aprovechamiento de los niveles de aptitud

$$\min_x f_2 = - \left(\sum_i \sum_j x_{ij} u_{ij} \right)$$

Restricciones:

-Variables de decisión binarias

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J$$

-Se debe asignar una única actividad a cada píxel

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I$$

-Solo se puede asignar el uso j en el píxel i si la función u_{ij} lo permite

$$x_{ij} \leq u_{ij} + 1 - u_{min} \quad \forall i \in I, j \in J$$

La aptitud define qué tan adecuado es el píxel i para el uso del suelo j . Para agricultura, ganadería / conservación el valor es 0 si no se puede realizar la actividad en el píxel i y tiene valores mayores a 0 y hasta 1 cuando se puede realizar. Para aforestación el valor es 0 si no puede realizarse la actividad o 1 cuando sí se puede realizar. El parámetro u_{min} es la menor aptitud distinta de cero, es decir $u_{min} = \min_{ij} \{u_{ij}\}$

Se consideró primeramente una formulación multiobjetivo basada en las funciones objetivo f_1 y f_2 , con el fin de minimizar la exportación de fósforo a la Laguna de Rocha y maximizar la aptitud en todos los píxeles (metodología de resolución de la suma ponderada). Posteriormente se pasó a considerar una segunda formulación con un único objetivo sujeto a una restricción (metodología de resolución de ε - restricción).

Método de resolución por suma ponderada (1)

$$\min (\alpha f_1 + (1 - \alpha) f_2)$$

sujeto a:

$$\sum_j x_{ij} = 1 \forall i$$

$$x_{ij} \leq u_{ij} + 1 - u_{min} \forall i \in I, j \in J$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \forall i \in I, j \in J$$

Donde:

α : es el valor que pondera el objetivo de fósforo sobre el objetivo de aptitud, definidos previamente. Toma valores del 0 al 1.

Método de resolución por ε - restricción (2)

$$\max - f_2$$

sujeto a:

$$f_1 \leq \text{umbral}$$

$$\sum_j x_{ij} = 1 \forall i$$

$$x_{ij} \leq u_{ij} + 1 - u_{min} \forall i \in I, j \in J$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \forall i \in I, j \in J$$

Donde:

umbral: es el valor máximo admitido de exportación de fósforo medido en KgP/ha/año. Notar que el parámetro *umbral* representa el valor ε del método

5. Resultados

Para el procesamiento de datos se compararon las distribuciones de usos y coberturas de los suelos con las aptitudes para las distintas actividades productivas. A partir de estos datos se ejecutaron, comparando luego los resultados, primero el método de suma ponderada y posteriormente el método de ε -restricción.

5.1. Situación actual en la Laguna de Rocha y parámetros de modelos

El análisis de la aptitud de los distintos usos del suelo considerados mostró que la aforestación puede realizarse en el entorno de 1/3 de la superficie de la cuenca. Por el contrario, la agricultura presenta una gran superficie de suelos con una aptitud relativamente baja y un grupo de píxeles con aptitudes relativamente altas. El uso del suelo ganadería / conservación en cambio presenta valores de aptitud relativamente bajos (Figura 1).

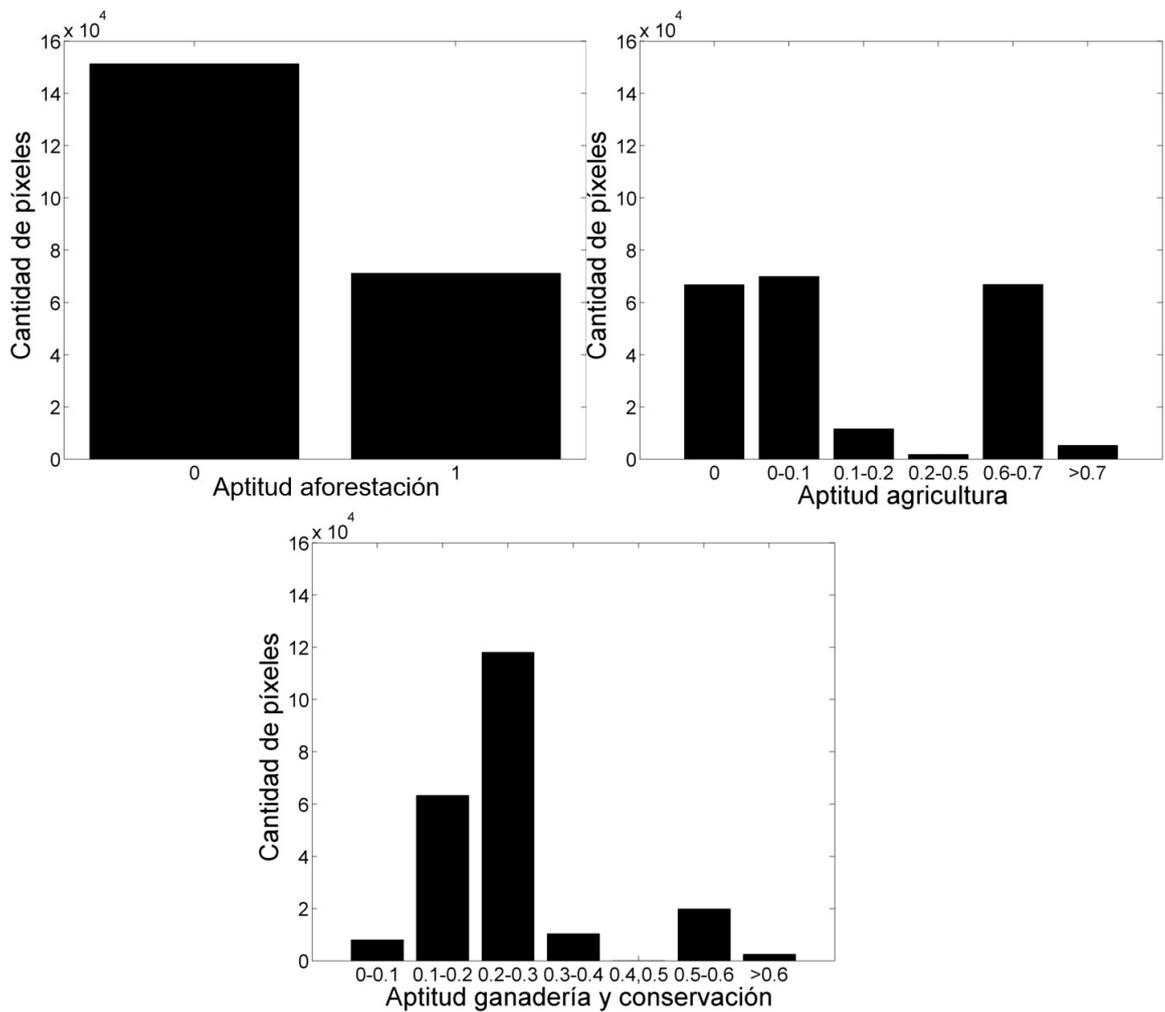


Figura 1: Histogramas de distribución de aptitud de los distintos usos del suelo: aforestación (izquierda), agricultura (derecha) y ganadería / conservación (abajo) mostrando la cantidad de píxeles con las aptitudes para los distintos usos del suelo

Combinando la información de distribución espacial de los valores de aptitud y de los usos del suelo, se pudo observar cómo se disponen las aptitudes de los distintos usos del suelo en la cuenca de la Laguna de Rocha, tanto cuantitativamente (Figura 1), así como espacialmente (Figura 2). La aptitud para ganadería / conservación tiene sus valores más altos en la zona media de la cuenca (Figura 2a). En el caso de la agricultura concentra sus mayores valores de aptitud en el sur y centro de la cuenca (Figura 2b). Para el caso de la aptitud para aforestación, se concentra en el norte de la cuenca, con menos parches al sureste (Figura 2c).

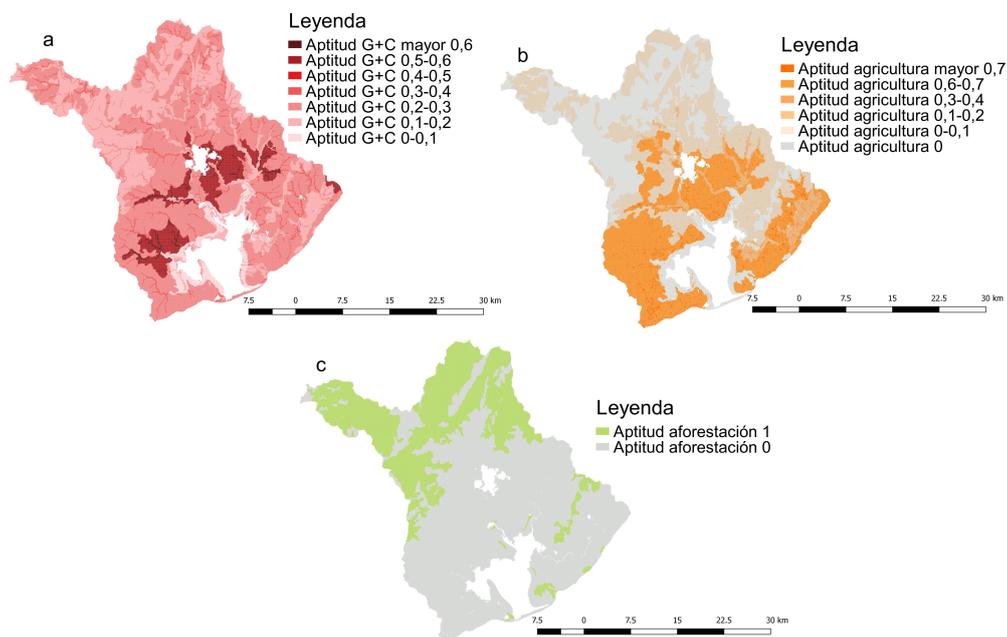


Figura 2: Mapas con la distribución de las aptitudes del uso del suelo ganadería / conservación (a), agricultura (b) y aforestación (c), según las aptitudes para cada uso obtenidas de (Rodríguez-Gallego et al., 2012)

Si analizamos el caso de la aptitud para la agricultura (Figura 2b) respecto a los usos del suelo actuales en la cuenca (Figura 3), se desprende que actualmente la agricultura se está realizando en gran medida en la zona con las aptitudes más altas para dicha actividad. Esta zona de mayor aptitud para la agricultura a su vez coincide con la cobertura del suelo de campo donde se realiza ganadería y conservación. Al comparar el mapa con la distribución de las aptitudes para aforestación (Figura 2c) con el mapa de las coberturas y usos del suelo actuales (Figura 3), se pudo ver una superposición de la ubicación actual de los bosques nativos con la zona apta para actividades de aforestación.

Tanto la superposición espacial entre los suelos aptos para agricultura con los de ganadería / conservación, así como de los suelos aptos para aforestación con los bosques nativos, denotan posibles conflictos entre usos productivos y conservación de la biodiversidad. Si se superponen los suelos aptos para agricultura con los suelos aptos para aforestación, se pueden encontrar posibles conflictos en los parches de suelo aptos para la aforestación al sur de la cuenca.

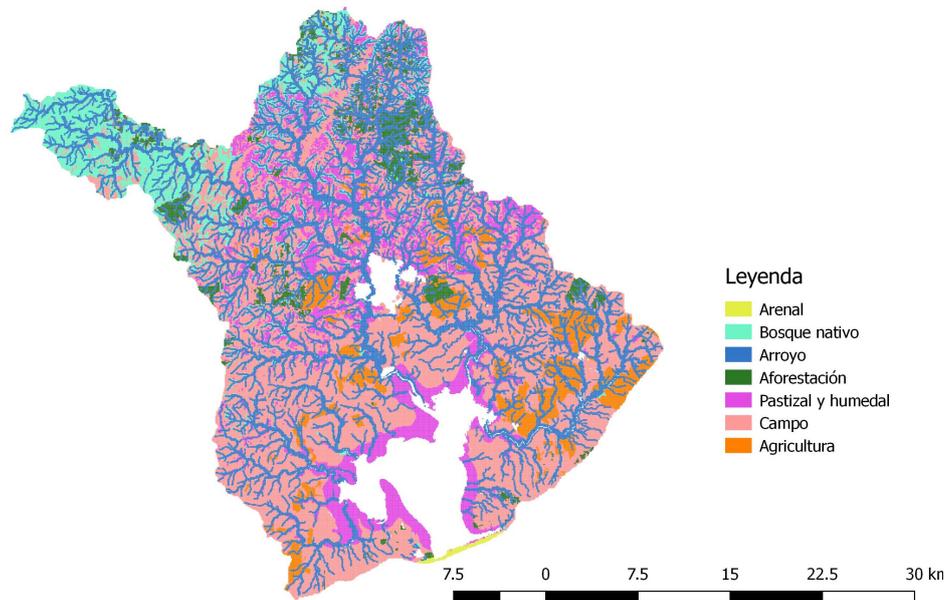


Figura 3: Mapa con la distribución de usos y coberturas de suelo de la cuenca de la Laguna de Rocha, según imagen satelital del 2011 (Nin, 2013)

5.2. Modelo de optimización

Se aplicaron dos métodos de resolución distintos para un modelo de optimización sobre los 95.939 píxeles que podían cambiar su uso del suelo de acuerdo a las características actuales de las coberturas o usos en la cuenca.

5.2.1. Método de resolución de suma ponderada

Para el método de resolución de suma ponderada, la agricultura resultante de la optimización se concentró en el sur de la cuenca, donde los valores de aptitud son superiores (Figura 2b). Cuando se le da mayor peso a maximizar las aptitudes totales en la cuenca (α con valores más chicos), el modelo priorizó la agricultura, que posee valores de aptitud más altos que ganadería / conservación (Figura 1). Las distribuciones de los usos del suelo resultantes de la optimización se mantuvieron estables para diferentes valores del parámetro $\alpha \leq 0,01$ (Figura 4 y 5).

Sucede lo opuesto para valores muy altos de α (Figura 4 y 5), cuando se favoreció el objetivo de minimizar la exportación de fósforo el uso del suelo priorizado fue ganadería / conservación, que posee menor índice de exportación de fósforo (Tabla 1). La ganadería / conservación en los valores mayores para el coeficiente α , pasó a ocupar la mayoría de los píxeles,

desapareciendo la agricultura (Figura 4 y 5), aunque se pudo notar que con valores de α menores, cuando predomina la agricultura, la ganadería / conservación se concentró en el centro de la cuenca donde los valores de aptitud para dicho uso del suelo son mayores (Figura 2a).

En el caso de la aforestación, las salidas se mantuvieron constantes para todos los valores de α (Figura 4 y 5). La aforestación se concentró también en las zonas donde la aptitud es máxima (Figura 2c) y no hubo otra cobertura que reemplace dicha actividad (Figura 3). Vale recordar que los valores para aptitud de aforestación son 0 y 1 (Figura 1) y la exportación de fósforo del uso es menor que la del uso agricultura (Tabla 1).

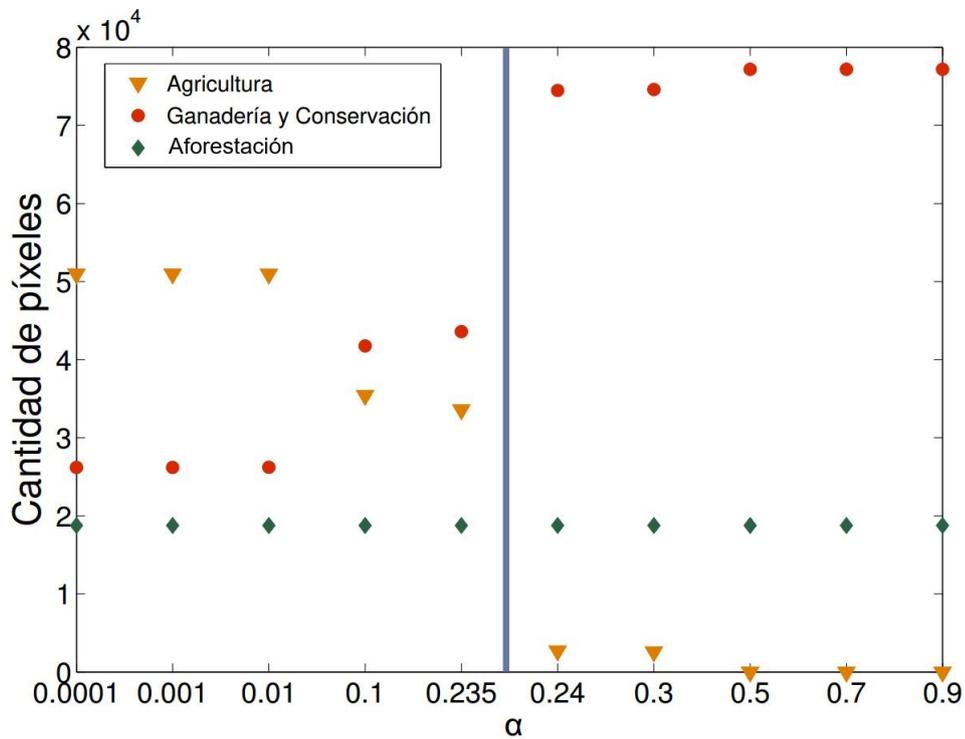


Figura 4: Variación de la cantidad de píxeles de los usos del suelo según los distintos valores del parámetro α en el método de resolución de suma ponderada

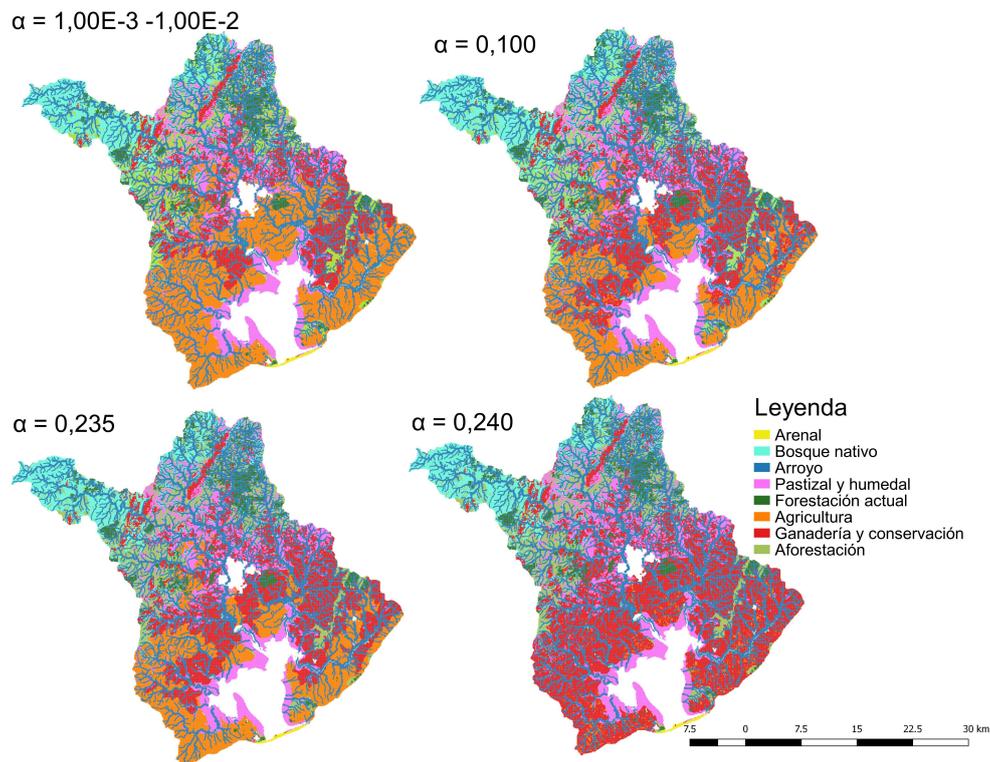


Figura 5: Mapas obtenidos con el método de resolución de suma ponderada, con los diferentes valores del parámetro α : $1E-3 -1E-2$; 0,100; 0,235; 0,240

En la metodología de resolución de suma ponderada, para mayores valores de α disminuyeron los píxeles asignados al uso del suelo agricultura y que poseen valores de aptitud altos para ganadería / conservación (Figura 6). Al mismo tiempo que aumentaron los píxeles asignados al uso del suelo ganadería / conservación con valores de aptitud altos para la agricultura (Figura 7).

Al ponderar los objetivos de minimizar el fósforo exportado a la Laguna de Rocha y de maximizar las aptitudes totales en la cuenca con distintos valores de α se encontró un salto entre los resultados de cada objetivo. Cuando el parámetro α es menor, la exportación de fósforo es de 51.610,9 KgP/ha/año y es muy superior al valor umbral de la eutrofización (32.173,8 KgP/ha/año), pasando a valores con una exportación de fósforo de 15.170,1 KgP/ha/año cuando el valor de α es alto. Para el objetivo de aptitud total los valores del orden de 4×10^4 pasan a un orden de 5×10^5 . Este salto se da entre los valores de alfa 0,235 y 0,240 y puede corresponder al cruce de valores que se puede observar en la Figura 4.

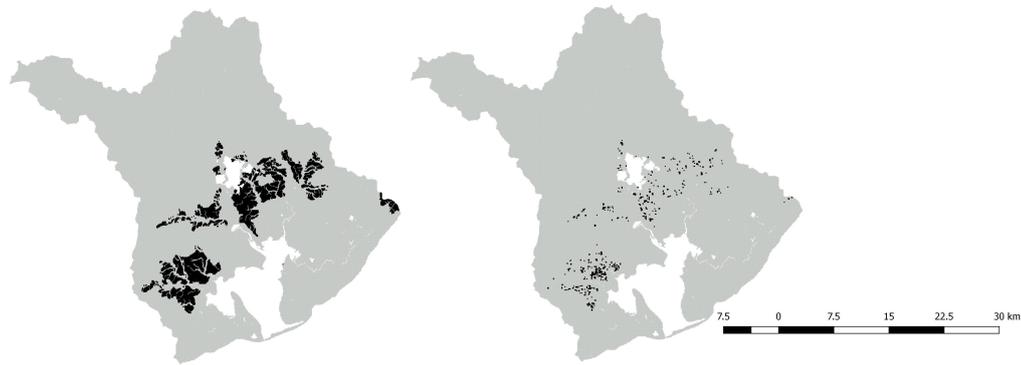


Figura 6: Mapas con la intersección entre aptitud para ganadería / conservación mayor a 0,5 y uso del suelo asignado agricultura, en el caso de los valores de α 0,0001-0,1 (izquierda) y del valor de α 0,1 (derecha). Para mayores valores de α el mapa no muestra píxeles que cumplan con ambas con dichos valores de aptitud para ganadería / conservación y haber sido asignados el uso del suelo agricultura

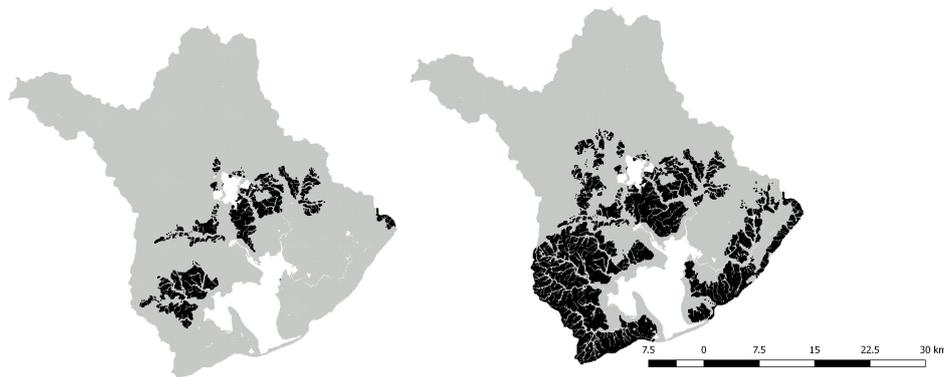


Figura 7: Mapas con la intersección entre aptitud para agricultura mayor a 0,5 y uso del suelo asignado ganadería / conservación, en el caso del valor de α 0,235 izquierda y del valor de α 0,24 a la derecha

5.2.2. Método de resolución ε -restricción

Para la metodología de resolución de ε - restricción se realizaron pruebas con diferentes valores de umbral de fósforo para evitar la eutrofización de la Laguna de Rocha. En el caso de valores bajos de *umbral* = 10000 KgP/ha/año no se encontró solución factible. Para valores superiores (25.000; 32.162,3; 40.000 y 60.000 KgP/ha/año) sí se encontraron soluciones. El valor de 32.173,8 KgP/ha/año es el correspondiente al máximo que el sistema soporta sin promover el crecimiento de cianobacterias (Cabrera, 2015).

Las soluciones encontradas de umbrales de fósforo más bajos no son espacialmente compactas, mostrando una distribución de los usos del suelo por franjas entre el uso del suelo agricultura y el uso del suelo ganadería / conservación (Figura 8). Se aprecia que a mayor *umbral*, más compacta es la imagen resultante (Figura 8).

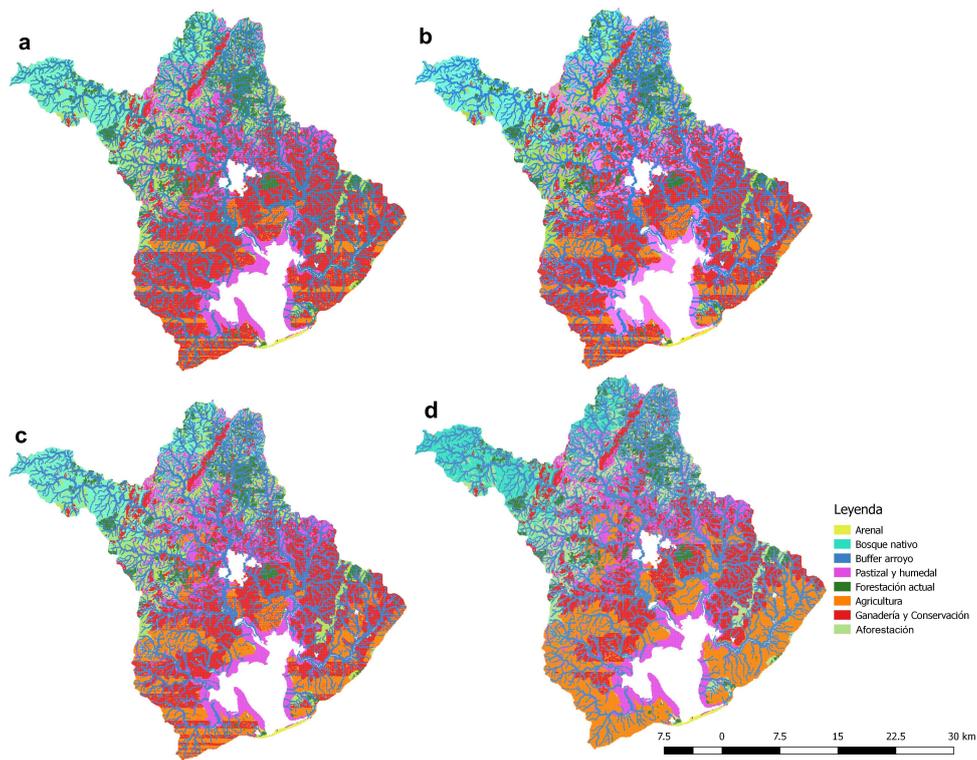


Figura 8: Mapa con los resultados de la metodología ϵ – restricción con distintos valores para el *umbral* de fósforo exportado por la cuenca a la Laguna de Rocha (KgP/ha/año) a) 25.000, b) 32.162,3, c) 40.000 y d) 60.000

5.2.3. Combinación de salidas para ambos métodos de resolución

Se graficaron juntas las soluciones de ambos objetivos halladas por la metodología de suma ponderada, con los objetivos obtenidos a partir de la metodología de ϵ – restricción (Figura 9).

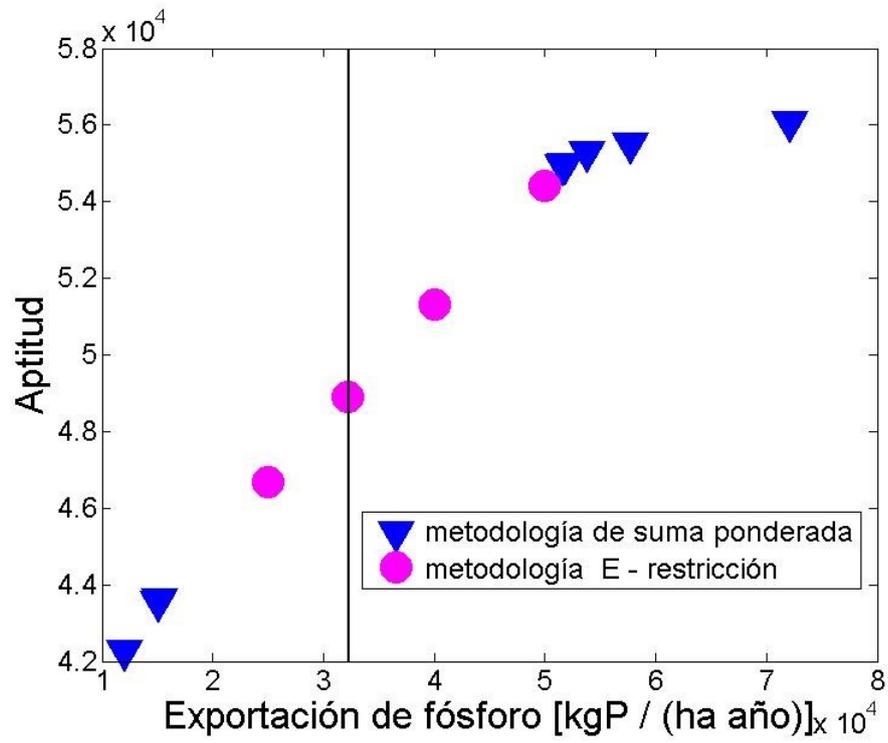


Figura 9: Salida de ambos objetivos hallados para la metodología de suma ponderada y la metodología ε - restricción

6. Discusión

En este trabajo se analizó la distribución de usos del suelo en la cuenca de la Laguna de Rocha y también de las aptitudes de dichos suelos para las distintas actividades: agricultura, aforestación y ganadería / conservación. Se experimentó con un modelo computacional de optimización lineal para abordar una problemática de planificación territorial incorporando valores de aptitud modelados por Rodríguez-Gallego et al. (2012). Las soluciones se abordaron a través de dos metodologías distintas de resolución de problemas de optimización con objetivos múltiples.

La sencillez del modelo empleado permite su fácil utilización y las salidas en forma de mapas facilitan la correcta interpretación por parte de los actores involucrados en el proceso de toma de decisión (Malczewski, 2006). El modelo utilizado fue realizado a partir de modificaciones a modelos previamente aplicados en el mismo territorio (Cabrera, 2015; Nin et al., 2016; Rodríguez-Gallego et al., 2012), pudiendo continuar un diseño repetido de ciclos de programación acercando el modelo a las necesidades de planificación del territorio (Groot & Rossing, 2011).

6.1. Situación de partida

Los mapas de aptitud poseen coincidencias menores entre los usos aforestación y agricultura y coincidencias algo mayores comparando agricultura con ganadería / conservación. Para el primer caso, donde las aptitudes de aforestación son siempre máximas (ya que la aptitud para aforestación toma valores de 0 ó 1) y su coeficiente de exportación de fósforo es menor que el de agricultura, implica que la aforestación estará ocupando suelos con aptitudes altas de agricultura. Esto significa que el modelo elegirá siempre el uso aforestación sobre los demás usos, en el caso que sea apto para dicha actividad, así es que se mantiene la cantidad de píxeles designados a aforestación en todas las salidas del modelo. Para futuros trabajos se puede tomar en consideración otros factores como los económicos para ponderar si esta preferencia de actividad se desprende de la misma manera en la realidad. También se pueden incluir otras restricciones ambientales como un valor umbral de fósforo para la cuenca debido a los impactos sobre la hidrología de la cuenca. Las consideraciones acerca de los distintos intereses, entre los que están los ambientales y económicos, coexisten e influyen el diseño de políticas de ordenamiento territorial (Rodríguez-Gallego et al., 2012).

En el segundo caso, comparando agricultura con ganadería / conservación, el resultado espacial va a depender de cuál objetivo esté siendo favorecido en la optimización, lo que significa que si el objetivo de maximizar las aptitudes en los suelos es el priorizado, el modelo seleccionará más agricultura.

Cuando se prioriza el minimizar el aporte de fósforo, habrá más ganadería / conservación seleccionados. El modelo permite de esta manera mayor variabilidad y flexibilidad, dejando un abanico de soluciones resultantes, mostrando que puede ser un enfoque adecuado en un problema real ya que aporta alternativas y da así más confianza a los actores involucrados en la toma de decisión (Langemeyer et al., 2016).

Al comparar posteriormente las aptitudes de los distintos usos del suelo con las coberturas y usos actuales en el territorio, se encontró que en algunas zonas aptas para ganadería / conservación se están realizando actividades agrícolas. Estas actividades se encuentran principalmente en zonas de alta aptitud para este uso del suelo, aunque hay zonas en el sur del territorio donde la aptitud es baja. El bosque nativo se encuentra en zonas aptas para aforestar, donde también hay actualmente algo de aforestación. Una pequeña parte de la aforestación también se hace en territorio no apto. Cabe aclarar que los píxeles correspondientes a bosque nativo, al igual que los píxeles con otras coberturas, no fueron tenidos en cuenta en el modelo de optimización, manteniéndose tal como están actualmente de acuerdo a la imagen satelital (Nin, 2013).

Se puede decir entonces, que actualmente podrían estar existiendo ciertos conflictos entre los usos del suelo debido a que tienen aptitud para usos incompatibles entre sí, y a su vez con recursos a conservar como lo es el bosque nativo. Estos posibles conflictos de intereses ya identificados deben ser tenidos en cuenta desde el inicio del proceso de planeamiento territorial, para así no suplantar un problema con otro problema (Potschin et al., 2010). La participación de los actores involucrados en la toma de decisión es un factor esencial para la apropiación del proceso donde las metodologías y modelos diseñados para la elaboración de alternativas sobre las que decidir deben ser reforzadas con la integración en los propios modelos de los intereses y valores de todos los actores involucrados en el proceso (Groot et al., 2007). Este trabajo puede ser reforzado integrando procesos participativos en el modelo.

6.2. Modelo de optimización

Para este trabajo se usan aptitudes con valores entre el 0 y el 1, obtenidos a partir de una modelación multiatributo basada en la opinión de expertos en la cuenca de las lagunas costeras de Uruguay (Rodríguez-Gallego et al., 2012). Esta novedad respecto a trabajos anteriores en el área de estudio (Cabrera, 2015) fue realizada para representar mejor a la realidad y por tanto tener mejores modelos para el proceso de toma de decisión, ya que el buen uso de información y metodologías disponibles como soporte de los procesos son de vital importancia (Chang et al., 1995).

Los modelos multiobjetivo no tienen una solución única, tienen múltiples soluciones óptimas que reflejan los diferentes niveles de compromiso entre los objetivos en conflicto. En el caso del método de resolución de suma ponderada las múltiples soluciones dependen de cuánta prioridad se le da a un objetivo sobre el otro (aumentar la aptitud total en el territorio sobre minimizar la exportación de fósforo a la Laguna de Rocha). De esta manera hay un abanico de soluciones posibles donde se ponderan intereses que pueden ser contrapuestos, como lo son el minimizar la exportación de fósforo y maximizar las aptitudes de usos del suelo en la cuenca. El valor α pondera los objetivos, cuanto mayor sea más fuerza tiene el objetivo de minimizar la exportación de fósforo a la Laguna de Rocha, por lo tanto el modelo seleccionará los usos del suelo con menor exportación de fósforo: ganadería / conservación (Tabla 1).

El salto que se observa entre los valores de alfa de 0,235 y 0,240 revela algunas limitaciones en cuanto a la aplicabilidad de este método en un contexto de planificación del territorio. En este salto los valores de exportación de fósforo pasan de estar muy por debajo del umbral a excederlo en gran magnitud. Por lo que no habrían valores intermedios en los que se encuentre agricultura y conservación coexistiendo sin pasar el valor umbral de exportación de fósforo de la Laguna de Rocha. No hay opciones donde los distintos actores involucrados se vean beneficiados. En los resultados de la metodología de suma ponderada, si los propietarios de los campos no dedican la totalidad de ellos a la ganadería / conservación, corren el riesgo de exceder el umbral de fósforo de la Laguna de Rocha pudiendo disminuir así la calidad del agua. Este salto se debe a la naturaleza de esta metodología para resolver problemas lineales multiobjetivo con variables enteras: la distribución uniforme del ponderador α no asegura un cubrimiento uniforme de los diferentes niveles de compromiso entre los objetivos. Además, hay configuraciones de los suelos resultantes que no se pueden encontrar para ningún valor de α , son las denominadas soluciones “no soportadas” (Ehr-gott & Gandibleux, 2000). En cambio el método ε -restricción no tiene este problema, pero revela una limitación del modelo de optimización adaptado en este trabajo al no contemplar explícitamente asignaciones espacialmente compactas.

Al observar los resultados de la metodología ε -restricción, se encuentran soluciones con exportación de fósforo en valores menores al umbral de fósforo (Figura 8 y 9). Existen salidas en alguno de los métodos de resolución aparentemente continuas para ambos objetivos, pudiendo delinear un set de soluciones Pareto óptimo. Esto significa que hay una colección de alternativas que no pueden ser mejoradas para uno de los objetivos sin comprometer al otro (Groot & Rossing, 2011), de las cuales algunas solo pueden ser encontradas por uno de los métodos de resolución.

6.2.1. Conflictos de intereses en la metodología suma ponderada

Se pueden comparar los usos del suelo asignados por la metodología de suma ponderada con las aptitudes de los mismos píxeles para los otros usos. De esta manera se podrían detectar distintos conflictos potenciales entre usos del suelo asignados y usos del suelo posibles para los distintos valores de α . Cuando prevalece el objetivo de maximizar las aptitudes, la agricultura se superpone con algunas zonas de aptitud alta de ganadería / conservación. Es bueno recordar que las aptitudes de ganadería / conservación son en promedio menores que los valores de aptitud de agricultura. Por otra parte si se le da mayor peso al objetivo de minimizar la exportación de fósforo, la superposición de ganadería / conservación con los suelos aptos para agricultura, aumenta en gran medida. Se encuentra que esta aplicación de un modelo de optimización multiobjetivo ofrece un análisis de los conflictos, sin perder de vista los compromisos posibles (Lee & Choi, 1996).

Este tipo de metodologías de resolución para problemas de optimización es un buen apoyo a la toma de decisión de problemas complejos como son aquellos relacionados al ordenamiento territorial, dando varias opciones para el intercambio y discusión entre actores (Lee & Choi, 1996).

6.2.2. Resultados método ε -restricción

En el caso del modelo con un único objetivo, si bien se llega a la solución óptima en tiempo aplicable al proceso de toma de decisión (10 segundos), la solución muestra, cuando el valor umbral de la restricción es menor, una distribución en franjas (probablemente relacionado a la forma de actuar del software CPLEX). Esta es una decisión arbitraria del software de resolución, la cual no incluye de forma explícita ningún criterio espacial expresado por el modelo.

La distribución resultante de los píxeles es poco aplicable en el contexto de la gestión de usos del suelo, ya sea por cuestiones de rentabilidad como de propiedad de los suelos, que requieren asignaciones más compactas. Se debería tener en cuenta una superficie mínima que haga rentable el uso del suelo, que puede no ser la misma para los distintos usos. Agregarle estos criterios podría aumentar considerablemente el tiempo de procesamiento del modelo, así como la complejidad de su formulación.

7. Conclusiones y perspectivas

Se tuvo éxito en aplicar un modelo de optimización que podría ser utilizado como apoyo en el proceso de toma de decisión para el ordenamiento territorial de la cuenca de la Laguna de Rocha.

La combinación de soluciones de ambas metodologías de resolución deja un amplio margen contemplando los compromisos entre los distintos intereses vinculados a la aptitud de los suelos y a la exportación de fósforo a la Laguna de Rocha. La aplicación del modelo de optimización es entonces exitosa en generar soluciones diversas para ser tenidas en cuenta en el proceso de planificación territorial. La definición espacial explícita a nivel de píxeles de media hectárea que es usada en el modelo es un beneficio para la toma de decisiones a escalas menores, pero posee la desventaja de poder tener soluciones no compactas.

La metodología de resolución de suma ponderada ofrece limitaciones a la hora de presentar soluciones que al manifestarse en este trabajo implican una desventaja para su aplicabilidad real. Ya que no se encontraron soluciones en un amplio espectro de salidas de exportación de fósforo cercano al valor umbral de la Laguna de Rocha, restringiendo así el abanico de opciones que podrían ser usados en la toma de decisión del ordenamiento territorial en la cuenca de esta laguna. En el caso de la metodología de resolución de ε - restringido es necesario agregar criterios de compactación y de ese modo se lograrían soluciones aplicables espacialmente.

Esta clase de trabajos, que acercan diversos conocimientos disciplinares con el objetivo de responder a problemas reales, son de gran importancia para el desarrollo humano sustentable. El desarrollo continuo de modelos utilizando parámetros más cercanos a la realidad se convierte en una ventaja para su utilización. La modelización matemática, en este contexto, ha demostrado poder ser usada como herramienta para fortalecer los procesos de toma de decisión para la gestión de los ambientes en Uruguay.

Para avanzar en la utilización de este tipo de metodología en la Laguna de Rocha se podría continuar agregando nuevas dimensiones relacionadas a los problemas ambientales como por ejemplo la económica y productiva. A la vez, con más dimensiones que considerar, aumentando la complejidad, nuevos tipos de metodologías de resolución pueden ser exploradas.

También cabe destacar, que este tipo de trabajo puede ser aplicado en otros territorios y contextos. Utilizando para ello otras grillas con la información pertinente de aptitud y exportación de fósforo o del nutriente que se desee estudiar. El tamaño de la grilla es uno de los factores influenciando los tiempos de resolución del modelo por lo que esto debe ser tenido en cuenta para nuevas aplicaciones. En nuevos contextos, las funciones objetivo pueden (y probablemente lo hagan) cambiar, pudiendo esto también

aumentar la complejidad. Esto nuevamente podría generar la necesidad de explorar otras metodologías de resolución, por ejemplo las de naturaleza no exactas basadas en poblaciones.

Referencias

- Aho, A. V., Hopcroft, J. E., and Ullman, J. D. (1988). *Estructuras de datos y algoritmos*, volume 1. Addison-Wesley Iberoamericana.
- Aubriot, L., Conde, D., Bonilla, S., Hein, V., and Britos, A. (2005). Vulnerabilidad de una laguna costera en una Reserva de Biósfera: indicios recientes de eutrofización. *Taller internacional de eutrofización de lagos y embalses. En: CYTED XVIIIB. Chile*, pages 65–85.
- Aubriot, L. E. (2008). Flexibilidad de la cinética de incorporación de fosfato por fitoplancton a las fluctuaciones en el suministro del nutriente. *Tesis de doctorado, Universidad de la República, PEDECIBA - Biología - Opción Ecología*.
- Baldwin, R., Scherzinger, R., Lipscomb, D., Mockrin, M., and Stein, S. (2014). Planning for land use and conservation: Assessing gis-based conservation software for land use planning. *Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station*, page 33.
- Bojórquez-Tapia, L. A., Ongay-Delhumeau, E., and Ezcurra, E. (1994). Multivariate approach for suitability assessment and environmental conflict resolution. *Journal of environmental management*, 41(3):187–198.
- Brundtland, G. H. and Khalid, M. (1987). Our common future. *Oxford, Oxford University Press*.
- Cabrera, C. (2015). Optimización de usos de suelo para prevenir floraciones nocivas de fitoplancton en la Laguna de Rocha, Uruguay. *Tesis de maestría, Universidad de la República, PEDECIBA - Geociencias*.
- Chang, N.-B., Wen, C., and Wu, S. (1995). Optimal management of environmental and land resources in a reservoir watershed by multiobjective programming. *Journal of environmental management*, 44(2):144–161.
- CPLEX (2017). Ilog ampl cplex System, Version 8.0. <https://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>.
- Diario-Oficial (2006). Decreto n 191/006. *Dirección Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales - IM.P.O. República Oriental del Uruguay*.
- Ehrgott, M. (2006). *Multicriteria optimization*. Springer Science & Business Media.
- Ehrgott, M. and Gandibleux, X. (2000). A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization. *OR-Spektrum*, 22(4):425–460.

- Falkner, G., Falkner, R., and Schwab, A. (1989). Bioenergetic characterization of transient state phosphate uptake by the cyanobacterium *Anacystis nidulans*. *Archives of Microbiology*, 152(4):353–361.
- Fourer, R., Gay, D. M., and Kernighan, B. W. (1987). *AMPL: A mathematical programming language*. AT&T Bell Laboratories Murray Hill, NJ 07974.
- Gough, J. D. and Ward, J. C. (1996). Environmental decision-making and lake management. *Journal of Environmental Management*, 48(1):1–15.
- Groot, J. C. and Rossing, W. A. (2011). Model-aided learning for adaptive management of natural resources: an evolutionary design perspective. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(6):643–650.
- Groot, J. C., Rossing, W. A., Jellema, A., Stobbelaar, D. J., Renting, H., and Van Ittersum, M. K. (2007). Exploring multi-scale trade-offs between nature conservation, agricultural profits and landscape quality: a methodology to support discussions on land-use perspectives. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120(1):58–69.
- Haakonsson, S., Rodríguez-Gallego, L., Somma, A., and Bonilla, S. (2017). Temperature and precipitation shape the distribution of harmful cyanobacteria in subtropical lotic and lentic ecosystems. *Science of The Total Environment*, 609:1132–1139.
- Huang, I. B., Keisler, J., and Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. *Science of the total environment*, 409(19):3578–3594.
- Lagos, X., Cabrera, C., and Nogueira L, R.-G. L. (2011). Experiencias en el proceso de implementación de un área Protegida. *Apuntes para la Acción II, sistematización de experiencias de extensión universitaria*. Extensión Libros, Udelar, Montevideo, Uruguay.
- Langemeyer, J., Gómez-Baggethun, E., Haase, D., Scheuer, S., and Elmqvist, T. (2016). Bridging the gap between ecosystem service assessments and land-use planning through Multi-Criteria Decision Analysis (mcda). *Environmental Science & Policy*, 62:45–56.
- Lee, S. and Choi, S. U.-S. (1996). Application of metallic nanoparticle suspensions in advanced cooling systems. Technical report, Argonne National Lab., IL (United States).
- Leflaive, J. and Ten-Hage, L. (2007). Algal and cyanobacterial secondary metabolites in freshwaters: a comparison of allelopathic compounds and toxins. *Freshwater Biology*, 52(2):199–214.

- Lovell, S. T. and Johnston, D. M. (2009). Designing landscapes for performance based on emerging principles in landscape ecology. *Ecology and society*, 14(1):44.
- Malczewski, J. (2006). Gis-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7):703–726.
- Moilanen, A. (2008). Two paths to a suboptimal solution—once more about optimality in reserve selection. *Biological Conservation*, 141(7):1919–1923.
- MVOTMA (2016). Plan de manejo - Paisaje Protegido Laguna de Rocha. *SISTEMA NACIONAL DE ÁREAS PROTEGIDAS DE URUGUAY*.
- Nin, M. (2013). Mapeo de servicios ecosistémicos en la cuenca de la laguna de rocha como un insumo para la planificación territorial. *Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República*.
- Nin, M., Soutullo, A., Rodríguez-Gallego, L., and Di Minin, E. (2016). Ecosystem services-based land planning for environmental impact avoidance. *Ecosystem Services*, 17:172–184.
- O'Farrell, P. J. and Anderson, P. M. (2010). Sustainable multifunctional landscapes: a review to implementation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(1):59–65.
- Potschin, M. B., Klug, H., and Haines-Young, R. H. (2010). From vision to action: Framing the Leitbild concept in the context of landscape planning. *Futures*, 42(7):656–667.
- QGIS, D. (2016). Quantum gis geographic information system. *Open Source Geospatial Foundation Project*. <http://www.qgis.org/es/site/>, 45.
- Reynolds, C. S. (1984). *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press.
- Rigler, F. (1956). A tracer study of the phosphorus cycle in lake water. *Ecology*, 37(3):550–562.
- Rodríguez-Gallego, L., Achkar, M., and Conde, D. (2012). Land suitability assessment in the catchment area of four Southwestern Atlantic coastal lagoons: Multicriteria and optimization modeling. *Environmental management*, 50(1):140–152.
- Rodríguez-Gallego, L., Santos, C., Amado, S., Gorfinkel, D., González, M., Gómez, J., Neme, C., Tommasino, H., and Conde, D. (2008). Costos

y beneficios socioeconómicos y ambientales del uso actual de la Laguna de Rocha y su cuenca. Insumos para la gestión integrada de un área protegida costera. *Informe Programa de Desarrollo Tecnológico, Udelar*.

Rodríguez-Gallego, L. and Soutullo, Á. (2013-2015). Planificación ambiental: aplicación de herramientas interdisciplinarias para el desarrollo sustentable. *Proyecto I+D, CSIC, Udelar*.

Schindler, D. W. (2006). Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 51(1):356–363.

Smayda, T. J. (1997). What is a bloom? a commentary. *Limnology and Oceanography*, 42(5):1132–1136.

Verrastro, N. (2015). Planificación ambiental espacial del municipio de La Paloma, Rocha Uruguay. Recomendaciones para su manejo costero integrado. *Tesis de maestría, Universidad de la República, Maestría en manejo costero integrado*.

Yang, X.-S. (2010). *Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications*. John Wiley & Sons.