

# Técnicas de optimización en problemas de planeación forestal en un contexto espacial con restricciones

Muricio Zapata-Cuartas

Estudiante Escuela de Ingeniería de Sistemas y computación

Universidad del Valle

Cali, Colombia

mauricio.zapata@correounivalle.edu.co

**Abstract**—Este documento presenta una revisión de literatura sobre técnicas computacionales para asistir la optimización de los planes de manejo forestales (PF) en un contexto de restricciones espaciales. Se trata con problemas combinatoriales NP-Complejos cuando se involucran restricciones para satisfacer requerimientos ambientales sobre muchas unidades de corta. Se presenta una clasificación de las técnicas de solución reportadas y se introducen los conceptos empleados en la formulación del problema espacial. En una segunda parte se describen algunos problemas que se presentan en la representación espacial de las restricciones y las perspectivas de trabajo futuro en este aspecto. No hay un consenso en el cual se clasifique la mejor técnica exacta, heurística o híbridas) y existen variadas formas de representación y formulación de los componentes espaciales para la optimización. Por tanto se plantea proponer un modelo orientado a la computación para diseñar conjuntos de restricciones de tal modo que se adapten a las técnicas de optimización dejando la parametrización al modelo y no al usuario.

**Keywords**— *Aprovechamiento forestal Heurísticas, Problemas combinatoriales, Representación espacial, Restricciones espaciales.*

## I. INTRODUCCIÓN

Tanto en las actividades productivas forestales como en general cualquier actividad del hombre sobre los ecosistemas, se identifican y se asocian impactos al ambiente. Estos impactos se han reconocidos que propician o aceleran el deterioro del recurso y a largo plazo pueden ser insostenibles. La actividad forestal se basa en el manejo y aprovechamiento de los recursos bosques (bien sea naturales o plantados). La creciente demanda por productos especialmente madera, los impactos al ambiente por las actividades de cosechas forestal y la creciente necesidad de preservar los hábitat y paisajes han llevado a los investigadores a una planeación más compleja de la operación para cumplir y satisfacer requerimientos operacionales y ambientales [1], [2].

Aquí la Planeación Forestal (PF) se refiere a la elección del plan de cortas que se debe seguir en un horizonte de tiempo (varios años o décadas). Los técnicas de optimización asisten la mejor elección del plan (secuencia de rodales o bloques que se debe intervenir) para cumplir un suministro de madera y simultáneamente cumplir otras restricciones. Dado que en la actividad forestal los tiempos entre la siembra y la corta duran

muchos años, no se puede esperar a validar en el tiempo una decisión de plan de cortas. Por esto, se debe acudir a las herramientas computacionales para simular y probar cuál combinación de elección de cortas es la más adecuada sin poder esperar para comprobarla.

Los modelos por lo general se orientan a maximizar el retorno económico en el área de trabajo. Esto significa que se busca minimizar los costos de manejo, transporte y movimientos de madera etc. y sobre este contexto los problemas de carácter espacial aparecen cuando se quiere además que las actividades se realicen cuidando que ciertas zonas no tengan áreas de cosecha más grandes que un límite fijado, que el tiempo entre consecutivas intervenciones en ciertas áreas no sea menor de un tiempo predefinido, que se mantengan las cualidades del recurso suelo. Estas consideraciones espaciales se tratan en los modelos de optimización como restricciones [3], [4]

El interés por investigar y mejorar la modelación del manejo de los recursos del bosque se explica por la creciente necesidad de satisfacer la demanda de productos de la madera y simultáneamente lograrlo dentro de una operación sostenible donde se minimice el impacto de las actividades humanas y de aprovechamiento sobre los recursos naturales.

En este trabajo se cubre una revisión de literatura con énfasis en la integración de restricciones espaciales a un problema de PF. En particular cuando se tratan uno o varios objetivos y se tienen escenarios espaciales con muchas unidades de corta, se obtienen problema de decisión combinatoriales NP-Complejos o NP-hard [5], [6]. Cuando se trata de resolver estos problemas con método exactos, se hace poco atractivos computacionalmente porque al incrementar la complejidad y el tamaño incrementa el costo computacional. Luego la tendencia es el uso de las técnicas heurísticas para asistir la planeación de actividades forestales [7]

EL documento se divide en dos secciones. En la primera se presenta un estado del arte en donde se presenta una clasificación de las técnicas de optimización más utilizadas en PF, se revisan y se introducen los conceptos empleados en la formulación del problema espacial y se hacen consideraciones sobre las características que se deben tener en cuenta en la modelación y finalmente se presenta un resumen sobre el uso de las técnicas de computación especialmente heurísticas y su

historia. En la segunda parte se formula una representación gráfica y numérica del problemas y muestra los retos computacionales en este campo. Por último, se hace una discusión de las opciones de comparación de técnicas como respuesta a la necesidad de demostrar calidad.

## II. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

En la literatura se han encontrado múltiples aproximaciones computacionales a la modelación y optimización de planes de corta con restricciones espaciales. La Tabla 1 presenta una agrupación de referencias, hasta ahora revisadas, en cuanto a la técnica utilizada (exactas o heurísticas) y el tipo de restricción considerada (su definición se presentan más adelante).

TABLE I. AGRUPACIÓN DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN SEGÚN RESTRICCIONES Y TÉCNICA

<i>Técnica</i>	<i>Método</i>	<i>Restricción</i>	<i>Referencia</i>
Heurístico	Genetic Algorithms	Flujo, conservación	[8], [9]
	Goal Programming	Adyacencia, ARM	[10]
	Great Deluge	Flujo	[11]
	Hooke-Jeeves	Flujo y Pérdida estocástica por fuego.	[12]
	Tabu Search	Flujo de volumen, no espaciales	[13]
		Adyacencia (Green up)	[14]
	Threshold accepting	Adyacencia (Green up)	[2]
	Programación dinámica	Adyacencia	[3]
	Simulated annealing	Adyacencia/(Green up)	[15], [16]
Exacto	Programación entera	Adyacencia (Green up)	[17],[6]
		Restricción de tamaños de área	[18]
	Programación entera multiestrato estocástica	Selección de unidades en el tiempo. Construcción de caminos	[19]
	Programación Lineal	Selección de unidades + incertidumbre	[20]
	Programación por restricciones	Restricciones binarias	[21], [22]
Review			[1], [23], [24]

A parte de las consideraciones espaciales sobre un área de trabajo, existe una necesidad de pensar que se debe satisfacer una dimensión temporal. Esto es, que en el tiempo se satisfagan criterios como producción de madera (volumen). Esto agrega necesariamente al problema una complejidad espacio-temporal.

Simulated annealing es una de las heurísticas más comunes aplicadas para este tipo de soluciones en PF, especialmente, cuando se anexan restricciones sobre construcción de vías

(habilitación de tramos para hacer accesible una unidad de corta). [1].

### A. Formulación del Problema Espacial

Algunas definiciones en el contexto de la planeación forestal espacial son importantes [17]:

- **Unidad de cosecha:** es un sector de superficie en plantación que está bajo el mismo esquema de manejo y especie y se conoce su sistema de cosecha.
- **"green-up" o exclusión:** es el tiempo especificado o requerido por una unidad de corta antes de que otra vecina sea cortada.
- **máxima área permitida (ARM:** Area-Restriction-Model), nacen de regulaciones de políticas estatales o ecológicas. Por ejemplo, en los Estados Unidos, en los Estados de California y Oregon el máximo área se fija entre 8 y 101 hectáreas [17]. Las restricciones de máxima área no limitan que una unidad de corta sea programada, lo que restringe es la totalidad del área cosechada dentro de un periodo de tiempo y por tanto está realcionada con el tiempo de exclusión.
- **Restricción de Adyacencia simple (URM:** Unit-Restriction-Model) cuando dos unidades comparten el mismo borde. Este tipo de restricción es más apropiada cuando las unidades de corta se aproximan al tamaño máximo permitido. esta restricción que prohíbe que dos unidades adyacentes sean simultáneamente cosechadas.

La idea de pensar en un modelo espacial es poder diseñar computacionalmente las siguientes propiedades sobre las representaciones espaciales: cada rodal o unidad de corta debe ser tratado como un componente individual, el modelo debe incorporar la posición relativa de cada unidad, debe tratar sus propiedades como parámetros y debe tratar las relaciones con las otras unidades para permitir modelar restricciones [2] .

Una propiedad deseable del modelo espacial es la agregación. [25] modela decisiones de cosecha en el largo plazo pero sobre unidades de paisaje (grandes áreas) que luego aplica agregaciones de rodales por similitudes definiendo bloques. La estrategia continúa, y dentro de los bloques se pueden encontrar áreas de diferentes usos del suelo. Esta estructura jerárquica de agrupación permite considerar diferentes niveles de decisión y al mismo tiempo aplicar restricciones dependiendo el nivel jerárquico.

A parte de la pregunta desarrollada aquí se podría considerar la siguiente preguntas de la cuales no se ha encontrado un consenso en la literatura:

Cómo se compara la eficiencia, el desempeño y adaptabilidad de diferentes técnicas de optimización en la solución a problemas de planeación forestal que contemplan restricciones espaciales e incertidumbre?

Se podrían combinar heurísticas para encontrar una más eficiente? O existirán innovaciones computacionales entre los métodos exactos para tratar estos problemas grandes? O existen implementaciones de algoritmos en otros campos de la ciencias que no se hallan probado en planeación forestal?

Dado que existen tantas variantes en los métodos basados en heurísticas, existe una medida de calidad sobre la solución con estos métodos? Se pueden combinar restricciones espaciales y temporales, extender la modelación de optimización a planes de cosecha con operaciones como transporte y diseño de vías?.

## B. Historia y Evolución

Algunos autores como [7] diagnostican que si bien la tasa de publicaciones con técnicas nuevas en estos temas en los últimos años no es creciente, si se está entrando a una era de comparaciones e implementación de variantes. Durante los 90's predominaron las técnicas exactas (programación lineal). A partir de los 2000's predominaron las técnicas heurísticas. Las técnicas exactas se siguieron utilizando como validación de las heurísticas. Sin embargo, las técnicas exactas quedan cortas cuando se está tratando problemas grandes (más de 1000 unidades de manejo). También se discute sobre el tipo de funciones objetivo consideradas (económicas, de hábitat, sobre la estructura del bosque, sobre biodiversidad, sobre recreación entre otras). Otro aspecto importante que resaltan estos autores es que los sitios en donde se ha originado las investigaciones no es muy extensivo, se concentra en países desarrollados. La falta de publicaciones en países en desarrollo es la falta de recursos para la realización de estos estudios o la falta de interés en estas cuestiones. Una explicación personal es la falta de asociación Empresa – Universidad y los temores de las empresas de mostrar sus métodos.

Los métodos heurísticos se han destacado más, y por tanto su uso, para solucionar estos problemas combinatoriales grandes del sector forestal [1]. Algunos reportes tipos review (Ver Tabla 1) permiten confirman esta tendencia.

Su uso en PF se justifica en cuanto el tamaño y cualidades de los problemas no lineales. Se encuentra literatura de su uso en todos los niveles: transporte, planificación estratégica, táctica en operaciones particulares [26]. Quizás la razón de esto es por cuanto las heurísticas tienen la habilidad de capturar la esencia del problema fácilmente y como hemos visto han surgido diferentes técnicas cada una con sus cualidades. No es claro para el autor como las consideraciones de incertidumbre se pueden modelar con técnicas heurísticas. Este sería un foco de interés en la investigación.

Entre las mayores limitantes en los esfuerzos de modelación para PF se relacionan con la validación de los procesos. Los resultados de un proceso de PF difícilmente se pueden validar comparando el plan con actividades recientes por lo que los horizontes de los modelos son de varios años o décadas. Por otro lado, cuando se obtiene un resultado de optimización un número de factores reales y dinámicos pueden suceder y afectar su ejecución. Además estos hechos suceden

con distribución incierta. [19] Involucra en su propuesta de modelación el efecto estocástico del precio de venta de madera, pero cuando se comienzan a considerar muchas variables estocásticas se obtiene problemas de alta dimensionalidad. Por esto, todos los niveles de incertidumbre no se pueden considerar en los modelos. A parte de estos comportamientos es deseable que el modelo de optimización seleccionado permita expresar estas consideraciones, que capture la esencia de lo que se está modelando. Por ejemplo cuando con programación lineal y con programación entera no se pueden lograr expresar ciertas restricciones se dice que se obtienen resultados de la “relajación” del problema. Por el contrario con heurísticas se pueden representar modelos complejos

Por último, existen además tendencias de regulación ambiental y de mercados verdes que están modificando y exigiendo a los desarrolladores de planes de cosecha forestal que cumplan con unos requisitos mínimos para garantizar que las operaciones bajo esos planes sean amigables con el medio ambiente y la sostenibilidad. Algunas certificaciones como la FSC ya está exigiendo regular el máximo de área cosechable en una unidad de corta [6].

## C. Comparación de técnicas

Por la naturaleza compleja de la optimización en PF, se encuentran varias propuestas en la literatura para tratar de justificar la elección de una u otra técnica. [17] comparan métodos exactos (Integer Programming) y Heurísticas considerando el manejo de las restricciones de adyacencia simples y utilizan grafos para representar tanto las unidades de corta como sus adyacencias.

Las comparaciones de técnicas surgen sobre la necesidad de encontrar una medida de calidad y decidir cuál es mejor para un problema específico.

Como los métodos heurísticos no pueden garantizar optimalidad, se requiere el desarrollo de una medida de calidad. Lo que frecuentemente se observa es una validación de los resultados que incluye: Tiempo de solución, complejidad de programa, estadísticas como mínimo, máximo, promedio, desviación. Estas son a menudo comparadas contra los resultados generados por otras heurísticas o idealmente contra una solución exactas, si existe. Si no se puede obtener una solución exacta, entonces se realizan comparaciones entre heurística, en este caso, se obtienen validaciones relativas.

[5] realiza una categorización de las diferentes tendencia de validación de resultados a partir de métodos heurísticos en problemas de PF, no necesariamente limitados a consideraciones espaciales. Concluye que en la práctica, en las publicaciones se hace un énfasis en la validación pero no existe un estándar para ello. Incluso, para los revisores de Journals esto es un tema relevante pues entre ellos se pueden encontrar opiniones diferentes de cuál validación es apropiada o no.

Una posible justificación para preferir las heurísticas, sin conocer si sus resultados son totalmente óptimos, es describir las limitaciones de los método exactos cuando se utilizan en problemas forestales. Es justificar el por qué se debe recurrir a

técnicas alternativas a las técnicas exactas más aún cuando se consideran elementos espaciales.

P.e. con los métodos exactos no se pueden formular relaciones complejas en forma lineal o con técnicas enteras mixtas. No se pueden resolver problemas en tiempos razonables y limitaciones en la cantidad de restricciones (filas) o variables que se puedan incluir en el problema.

Algunas limitaciones del uso de los métodos heurísticos en los casos de ejemplo revisados en la literatura son:

- 1) Se requiere tiempo para desarrollar un método de parametrización para cada problema de planeación específico,
- 2) No hay un estándar en la representación de las restricciones.
- 3) Imposibilidad de garantizar que se obtiene una solución óptima o que sean "cercanas".

### III. REPRESENTACIÓN DE RESTRICCIONES ESPACIALES

Las restricciones espaciales en PF controlan la forma como los métodos de optimización realizan la selección de unidades de corta. Por eso es importante entender una representación básica de éstas para su implementación computacional.

#### A. Adyacencia y Green-Up

Se orientan a evitar la concentración de unidades de corta. Adyacencia se refiere a la proximidad espacial de un área con respecto a otra. Se define cuando dos áreas comparten un mismo borde o punto. La restricción se basa en prohibir que dos áreas adyacentes sean simultáneamente tratadas. Esto se puede representar considerando una variable de decisión para la unidad de corta  $i$ :

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si la unidad } i \text{ es cosechada} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Para dos unidades adyacentes  $i$  y  $i'$  se puede definir una condición que limita su cosecha a lo sumo a uno de estas:

$$x_i + x_{i'} \leq 1 \quad (1)$$

Así, la restricción puede ser aplicada a todas las unidades adyacentes  $N_i$  a la unidad  $i$ . La implementación de esta restricción en un contexto espacial configura URM. El resultado de esta restricción configura una selección como se muestra en la Figura 1a. Si sobre este conjunto de restricciones se incluye aspectos temporales la notación anterior se extiende así:

$$x_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si la unidad } i \text{ es cosechada en el periodo } t \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Si la orientación es hacia limitar un impacto localizado la condición en (1) se puede generalizar para que incluya tanto aspectos espaciales como temporales así:

$$\sum_{t'=t-p}^{t+p} (x_{it'} + x_{i't'}) \leq 1 \quad (2)$$

Donde  $p$  es un periodo de exclusión predefinido. La expresión en (2) define el requerimiento que en la literatura denominan green-up en donde un área no puede ser cosechada si una unidad adyacente ya ha sido cosechada dentro de un periodo de tiempo predefinido antes o después del actual periodo  $t$ .

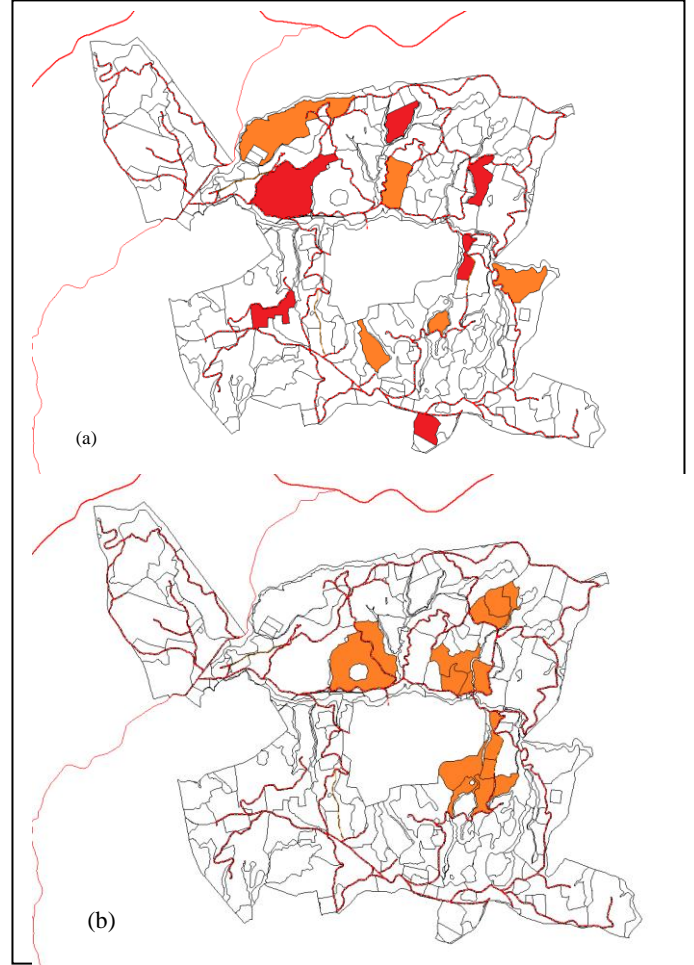


Fig. 1. Ejemplos de selección de unidades de cosecha en un periodo  $t$  sobre un mapa con muchas posibles áreas de bosque. (a) Cuando se utiliza Unit-Restriction-Model (URM) o (b) cuando se usa Area-Restriction-Model (ARM).

#### B. Restricción por área

En este caso se puede configurar uno o más unidades de cosecha adyacentes para conformar una unidad de cosecha pero de tal modo que no violen un máximo de área predefinida.

Esto es  $a_i + a_{i'} < A$  representa una posibilidad de selección. El resultado de esta restricción configura una selección como se muestra en la Figura 1b. Esta representación de restricción define ARM. En [4] se introduce un concepto nuevo que es el bloque. Un bloque es un conjunto de unidades de cosecha adyacentes que cumplen la restricción de área. Luego la formulación del problema es encontrar los bloques posibles espacialmente. Para esto se introduce una variable binaria

nueva  $y_l$  que toma el valor de 1 si el bloque  $l$  se cosecha es 0 en otro caso. Existen dos condiciones en las cuales dos bloques no se pueden cosechar: cuando dos bloques comparten una misma unidad o cuando dos bloques son adyacentes. El listado de posibles combinaciones de bloques resulta en una tarea compleja de visualizar. Finalmente una representación del modelo a optimizar podría ser de la siguiente forma:

$$\text{Maximizar } \sum_l \sum_t \beta_{lt} y_{lt}, \quad (3)$$

Sujeto a

$$\sum_{t'=t-p}^{t+p} (y_{lt'} + y_{l't'}) \leq 1 \quad \forall l, l' \in \Omega_l, t, \quad (4)$$

$$\sum_l v_{lt} y_{lt} \leq U_t \quad \forall t, \quad (5a)$$

$$\sum_l v_{lt} y_{lt} \geq L_t \quad \forall t \quad (5b)$$

$$\sum_l y_{lt} \leq 1 \quad \forall l, \quad (6)$$

$$y_{lt} = \{0,1\} \quad \forall l, t, \quad (7)$$

Donde  $\beta_{lt}$  puede ser el retorno de cosechar el bloque  $l$  en el periodo  $t$ ,  $v_{lt}$  es el volumen de producto por la cosecha del bloque  $l$  en el periodo  $t$ ,  $U_t$  es el límite superior de volumen a cosechar en un periodo  $t$ , y  $L_t$  es el límite inferior del volumen total cosechado en el periodo  $t$ . Entonces (3) es la función objetivo, (4) imponen restricciones de bloques con incompatibilidad de selección simultánea, (5) impone restricciones sobre la cantidad de producto que se requiere cosechar en cada periodo (6) garantiza que un bloque sea cosechado al menos una vez y (7) indica una condición de variable de decisión. Este modelo se puede extender con más restricciones por ejemplo de accesibilidad, edades de los bosques o variedad de productos entre otros. Se han implementado heurísticas para este tipo de modelo como en [17] y [16].

La representación de las restricciones entre unidades o bloques se puede llevar a un formato de grafo y tratar la representación del problema con elementos de nodos y relaciones. Esta aproximación no ha sido bien explorada en la literatura con aplicación al campo forestal.

#### IV. CONCLUSIONES

Las consideraciones espaciales en los planes de cosecha forestal representa nuevos retos para los Ingenieros tanto forestales como de sistemas. El avance y contribuciones en la solución computacional para hallar óptimos en estos problemas complejos constituyen un nicho de constantes aportes e investigación. De la revisión de literatura se evidencia una evolución de las técnicas utilizadas para estos problemas, en los últimos años han predominado las basadas en heurísticas y se están proponiendo constantes variantes y combinaciones de

métodos. Los métodos exactos se han restringido a problemas de pequeña escala y cuando es posible se utilizan como herramienta de validación de alguna propuesta heurística. En cuanto al hilo conductor de la investigación propuesta, el reto computacional para futuros trabajos es la implementación conceptual de las restricciones espaciales a través de conceptos y técnicas computacionales existentes que permitan la parametrización de los modelos heurísticos basados en un modelo general.

Se encontraron otras preguntas amplias relacionadas con el tema de investigación. Algunas son:

- Cómo compara la eficiencia, el desempeño y adaptabilidad de diferentes técnicas de optimización en la solución a problemas de planeación forestal que contemplan restricciones espaciales e incertidumbre?
- Se podrían combinar heurísticas para encontrar una más eficiente? O existirán innovaciones computacionales entre los métodos exactos para tratar estos problemas grandes? O existen implementaciones de algoritmos en otros campos de las ciencias que no se hallan probado en planeación forestal?

Dicho esto, la tendencia en la literatura a la fecha es adaptar técnicas computacionales heurísticas a problemas particulares, de variados tamaños y objetivos. No hay un consenso en el cual se clasifique la mejor técnica y existen variadas formas de representación y formulación de los componentes espaciales para la optimización. La investigación en curso pretende abordar y proponer un modelo orientado a la computación para diseñar conjuntos de restricciones de tal modo que se adapten a las técnicas heurísticas dejando la parametrización al modelo y no al usuario. Esto facilitaría la selección de la heurística y comparar entre varias candidatas de una manera más natural.

#### AGRADECIMIENTOS

Al profesor Victor A. Bucheli de la Escuela de Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad del Valle por sus acertados comentarios durante la escritura del trabajo.

#### REFERENCES

- [1] E. Z. Baskent and S. Keles, "Spatial forest planning: A review," *Ecol. Modell.*, vol. 188, no. 2–4, pp. 145–173, Nov. 2005.
- [2] P. Bettinger, D. L. Johnson, and K. N. Johnson, "Spatial forest plan development with ecological and economic goals," *Ecol. Modell.*, vol. 169, no. 2–3, pp. 215–236, Nov. 2003.
- [3] J. G. Borgesa and H. M. Hoganson, "Structuring a landscape by forestland classification and harvest scheduling spatial constraints," *For. Ecol. Manage.*, vol. 130, no. 1–3, pp. 269–275, May 2000.
- [4] A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal, R. Epstein, J. Miranda, C. Alford, M. Brazil, and D. Lee, *Handbook Of Operations Research In Natural Resources*, vol. 99. 2010.

- [5] P. Bettinger, J. Sessions, and K. Boston, "A review of the status and use of validation procedures for heuristics used in forest planning," *Math. Comput. For. Nat. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 26–37, 2009.
- [6] N. Könnnyü and S. F. Tóth, "A cutting plane method for solving harvest scheduling models with area restrictions," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 228, no. 1, pp. 236–248, Jul. 2013.
- [7] Y. Shan, P. Bettinger, C. J. Cieszewski, and R. T. Li, "Trends in spatial forest planning," *Math. Comput. For. Nat. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 86–112, 2009.
- [8] F. Crick, "Técnicas De Computación Evolutiva," Tesis Maest. En Informática, p. 16, 2004.
- [9] D. G. Fotakis, E. Sidiropoulos, D. Myronidis, and K. Ioannou, "Spatial genetic algorithm for multi-objective forest planning," *For. Policy Econ.*, vol. 21, pp. 12–19, Aug. 2012.
- [10] T. Gómez, M. Hernández, J. Molina, M. a. León, E. Aldana, and R. Caballero, "A multiobjective model for forest planning with adjacency constraints," *Ann. Oper. Res.*, vol. 190, pp. 75–92, 2011.
- [11] Y.-H. Kim, P. Bettinger, and M. Finney, "Spatial optimization of the pattern of fuel management activities and subsequent effects on simulated wildfires," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 197, no. 1, pp. 253–265, Aug. 2009.
- [12] J. Garcia-Gonzalo, T. Pukkala, and J. G. Borges, "Integrating fire risk in stand management scheduling. An application to Maritime pine stands in Portugal," *Ann. Oper. Res.*, vol. 219, pp. 379–395, 2014.
- [13] P. Bettinger, K. Boston, Y.-H. Kim, and J. Zhu, "Landscape-level optimization using tabu search and stand density-related forest management prescriptions," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 176, no. 2, pp. 1265–1282, Jan. 2007.
- [14] P. Bettinger, J. Sessions, and K. Boston, "Using Tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game," *Ecol. Modell.*, vol. 94, no. 2–3, pp. 111–123, Jan. 1997.
- [15] M. Boyland, J. Nelson, and F. L. Bunnell, "A test for robustness in harvest scheduling models," *For. Ecol. Manage.*, vol. 207, no. 1–2, pp. 121–132, Mar. 2005.
- [16] M. S. Castellazzi, J. Matthews, F. Angevin, C. Sausse, G. A. Wood, P. J. Burgess, I. Brown, K. F. Conrad, and J. N. Perry, "Simulation scenarios of spatio-temporal arrangement of crops at the landscape scale," *Environ. Model. Softw.*, vol. 25, no. 12, pp. 1881–1889, Dec. 2010.
- [17] T. M. Barrett and J. K. Gilles, "Even-aged restrictions with sub-graph adjacency," *Ann. Oper. Res.*, vol. 95, pp. 159–175, 2000.
- [18] I. Martins, M. Constantino, and J. G. Borges, "A column generation approach for solving a non-temporal forest harvest model with spatial structure constraints," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 161, no. 2, pp. 478–498, Mar. 2005.
- [19] A. Alonso-Ayuso, L. F. Escudero, M. Guignard, M. Quinteros, M. Quinteros, and A. Weintraub, "Forestry management under uncertainty," *Ann. Oper. Res.*, vol. 190, pp. 17–39, 2011.
- [20] B. J. Pickens, G. J. Hof, and M. B. Kent, "use of chance-constrained programming to account for stochastic variation in the a-matrix of large-scale linear programs: a forestry application," vol. 31, pp. 511–526, 1991.
- [21] R. Barták, "Theory and Practice of Constraint Propagation," 2001.
- [22] R. Barták, "Constraint Programming : In Pursuit of the Holy Grail," *Theor. Comput. Sci.*, vol. 17, pp. 555–564, 1999.
- [23] M. J. Hill, R. Braaten, S. M. Veitch, B. G. Lees, and S. Sharma, "Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: the ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis," *Environ. Model. Softw.*, vol. 20, no. 7, pp. 955–976, Jul. 2005.
- [24] M. Kurttila, "The spatial structure of forests in the optimization calculations of forest planning — a landscape ecological perspective," *For. Ecol. Manage.*, vol. 142, no. 1–3, pp. 129–142, Mar. 2001.
- [25] P. Bettinger, M. Lennette, K. N. Johnson, and T. A. Spies, "A hierarchical spatial framework for forest landscape planning," *Ecol. Modell.*, vol. 182, no. 1, pp. 25–48, Feb. 2005.
- [26] A. Weintraub and A. T. Murray, "Review of combinatorial problems induced by spatial forest harvesting planning," *Discret. Appl. Math.*, vol. 154, no. 5, pp. 867–879, Apr. 2006.