

Selección de alternativas en el tratamiento de suelos degradados utilizando métodos multicriterio

Selection of alternatives in the treatment of degraded soils using multicriteria methods

Oswaldo Alberto Fosado Téllez^{1*}, Jorge Luis Cue García², Antonio Torres García¹, Elizabeth Fosado Obregón³, Rolando V. León Aguilar¹, Julio Mero Muñoz¹

¹ Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Manabí, Ecuador.

² Facultad de Ingeniería Agrícola Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

³ Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba.

* Autor para correspondencia: ofosado@utm.edu.ec

Resumen

La selección de alternativas en el tratamiento de suelos degradados involucra un conjunto de criterios técnico-económicos que tienden a contraponerse entre sí desde el punto de vista matemático. En este trabajo se conjugan dos métodos multicriterio discretos para la selección de alternativas más eficientes generadas por el Sistema Integrado SIMONIT en el tratamiento de suelos degradados: *Analytic Hierarchy Process* (AHP) y *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE). La aplicación de los métodos, a partir de los niveles de prioridad que los centros decisores otorgaron a cada uno de los criterios de selección, permitió seleccionar la alternativa "Aplicación de materia orgánica más subsolación con multiarado" en un área de la provincia de Pinar del Río, Cuba.

Palabras clave: Conjugación de AHP y PROMETHEE, Toma de Decisiones Multicriterio Discreta, Tratamiento de Suelos.

Abstract

The selection of alternatives in the treatment of degraded soils involves a set of technical-economic criteria that tend to counteract each other from a mathematical point of view. In this work, two discrete multicriteria methods are conjugated for the selection of more efficient alternatives generated by the SIMONIT Integrated System in the treatment of degraded soils: *Analytic Hierarchy Process* (AHP) and *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE). The application of the methods on the basis of the priority levels given by the decision centers to each of the selection criteria allowed the selection of the alternative "Application of organic matter plus subsoiling with mulch" in an area of the Province of Pinar del Río, Cuba.

Key words: AHP-PROMETHEE Conjugation, Discrete Multicriteria Decision Making, Soil Treatment.



Recibido: 30 de mayo, 2016
Aceptado: 30 de noviembre, 2016

Introducción

La agricultura cubana enfrenta el reto de establecer un sistema agrícola sostenible, capaz de solventar la creciente demanda alimentaria, con una disponibilidad de área agrícola ascendente a 6,7 millones de hectáreas (Muñiz, 2010), sin embargo, se enfrenta a la degradación de los suelos como un problema esencial que afecta la productividad.

Según Díaz y Oliveros (2014) un 43,3% de la superficie de suelo agrícola en el país es afectada por la erosión. En opinión de Riverol *et. al.* (2004), los suelos de menor resistencia a la erosión son los alíticos, debido a los bajos contenidos de materia orgánica, poca profundidad efectiva, baja permeabilidad textural y estructura desfavorable al proceso erosivo. Este tipo de suelos se encuentran en la llanura sur de la provincia de Pinar del Río.

Son múltiples las investigaciones referidas a las prácticas de manejo encaminadas a revertir la degradación de estos suelos. Destaca el trabajo de Fernández (2015) quien recomienda la rotación de cultivos como alternativa viable para reducir o detener el deterioro de la fertilidad, mejorándola en diversos casos. Por su parte Valverde, Alvarado, Chancosa, Viana y Parra (2015) y Prager, *et. al.* (2012) abordan el uso de abonos verdes. Está en auge también la utilización de alternativas nutricionales el humus de lombriz, según Mogollón, Martínez y Torres (2016), Cortés, Bravo, Martín y Menjivar (2016) y Ramirez, *et. al.* (2015). Otros trabajos abordan la aplicación de mejoradores minerales y orgánicos. Al respecto, Esteban, Pacheco, Tapia y Bastías (2016), Soto, Piña, Sánchez, Pérez y Basurto (2016) y Tácuna, Aguirre y Flores (2015) obtuvieron resultados favorables con la aplicación de materia orgánica.

Una propuesta de manejo integrado de suelo propuesta por Olivares (2016) y Llanes, Cabrera, Otero y Domínguez (2012), muestra como resultado la mejora del pH, contenido de materia orgánica, P_2O_5 , K_2O , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , CCB, CCC, densidad aparente y porosidad estructural.

Hernández, Bernal, Ríos, Muñoz y González (2015) incrementaron el rendimiento agrícola de los cultivos al emplear medidas de conservación de suelos, unido a la mejora de las propiedades químicas y físicas en el área de estudio.

Las alternativas biológicas también son empleadas para el mejoramiento de suelos, tales como: Biosorción tratado por Covarrubia, García y Peña, (2015); Biolixiviación (heterotrófica y autotrófica) y Biovolatilización, según Covarrubia *et al.*, (2015). Estas propuestas son procesos microbianos utilizados principalmente en el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados.

Como se puede inferir, son diversas las alternativas de solución que se proponen para el tratamiento de los suelos degradados, todas ellas con diferentes efectos en objetivos trazados, dentro de los que, un peso importante tienen la minimización de los costos de aplicación y la maximización del índice de calidad del suelo.

Al respecto, tomar decisiones constituye una tarea difícil sobre todo si los criterios de selección de alternativas muchas veces entran en conflicto entre sí. La solución que genere los mejores índices de calidad no necesariamente tiene que ser la más económica ni la que garantice indicadores estables en todos los parámetros a evaluar. La solución a esta problemática está en el uso de métodos multicriterio para la toma de decisiones.

Desde el punto de vista teórico, Velazquez y Hester (2013) realizan un análisis evolutivo de los principales métodos multicriterio existentes, mostrando un patrón común de mejoras en sus aplicaciones, destacando como la combinación de varios elimina las deficiencias que se pueden observar en algunos métodos en particular.

Los métodos multicriterio contribuyen al proceso de selección de estas alternativas en el campo agronómico. Innumerables son los trabajos presentados en este sentido, destacando en los últimos años Jozi y Ebadzadeh (2014), en su evaluación de capacidades agrícolas de una

cuenca en el proceso de selección de sitios más eficientes. Pourkhabbaz, Javanmardi, Yavari y Sabokbar (2013) también utilizan estas técnicas para la evaluación de las tierras agrícolas, mientras que Widiatmaka, Ambarwulan y Sudarsono (2016) presentan la utilización de métodos multicriterio, específicamente el AHP, para la asignación de pesos en la selección de tierras aptas para la agricultura a partir de siete criterios de selección.

La situación actual de los suelos de la Llanura Sur de Pinar del Río, ubicada en el extremo occidental de Cuba, muestra su degradación en diversas manifestaciones. Debido a su proceso de formación, son poco fértiles y de baja productividad para algunos cultivos, no obstante han sido severamente explotados fundamentalmente en el cultivo del arroz. Los principales tipos de suelos existentes en la zona son Acrisol Chromic-Ferric y Acrisol Aluminic-Chromic, de acuerdo con IUSS Working Group WRB (2015).

Con el objetivo de contrarrestar los efectos negativos en los suelos degradados, el Instituto de Suelos de Cuba ha desarrollado y aplicado el Sistema Integrado SIMONIT (1998-2001), en varias áreas del territorio nacional, entre ellas zonas problemáticas de la Llanura Sur de la Provincia de Pinar del Río.

El uso de este sistema permite determinar propuestas de alternativas tecnológicas que solucionen los problemas de degradación, pero carece de una metodología que contemple el análisis costo-beneficio de la solución tecnológica a establecer, sobre todo si se tiene en cuenta que ninguna de estas alternativas presenta dominancia en los criterios de selección de las mismas.

El objetivo de este trabajo es seleccionar las alternativas más eficientes, generadas por el Sistema Integrado SIMONIT, destinadas al tratamiento de los suelos degradados de la Llanura sur de la provincia de Pinar del Río Cuba, considerando criterios económicos, ambientales y técnicos, mediante una metodología basada

en la combinación de técnicas para la toma de decisiones multicriterio discretas.

Metodología

Área de estudio

El área de trabajo pertenece al Polígono 33 de la Cooperativa de Producción Agropecuaria 17 de Mayo, ubicada en la Llanura Sur de Pinar del Río, Cuba. Se localiza en las hojas cartográficas de "Cubanacán" No 3583 III y en la hoja "Alonso de Rojas" N° 3582-IV, a escala 1:25 000; entre las coordenadas: Norte desde la 276000 hasta la 286000 y por el Este de la 246000 hasta la 252000. Las áreas de referencias se encuentran en la llanura costera sur junto a la desembocadura del Río Santa Clara. El paisaje muestra una secuencia de sabana en toda el área.

Descripción de los módulos del Sistema Integrado SIMONIT

El Sistema Integrado SIMONIT está conformado por cinco módulos: Información, Soluciones, Toma de Decisiones, Monitoreo y Análisis de Impactos, los cuales interactúan entre si y generan información básica para el proceso de toma de decisiones en el tratamiento de suelos degradados.

Este trabajo se centra en el módulo de Toma de Decisiones, teniendo en cuenta que en los módulos que le preceden (Información y Solución) la problemática de un área determinada no queda expresada con todos los detalles que necesitan los centros decisores para desarrollar las actividades que les sugiere el sistema. Ese vínculo se logra en el referido módulo, el cual sintetiza la relación problemas-soluciones y lo expresa en un mapa, de fácil comprensión por los decisores, a quienes les sirve de consulta constante.

No obstante, a pesar de recibir el nombre de Toma de Decisiones, este módulo se limita a entregar un cúmulo de soluciones difíciles para el decisor de escoger entre ellas. Los criterios

de selección de la alternativa más eficientes tienen diferentes niveles de importancia para un momento dado y mejorar uno puede implicar sacrificar uno o varios de los restantes. Se necesita, por tanto, la incorporación de herramientas que ayuden a “decidir”.

Toma de decisiones multicriterio

Para la toma de decisiones se necesitan herramientas que le permitan al centro decisor escoger, entre el gran cúmulo de posibles soluciones, aquella que se ajuste a los requerimientos que este plantee. Debe tenerse en cuenta que cada una de estas soluciones garantiza un comportamiento diferente en los indicadores que el centro decisor considerará, basado en el peso que cada uno de ellos le asigne para la decisión final.

Se hace necesario entonces el uso de métodos que permitan valorar simultáneamente varios objetivos con un peso diferente de cada uno y escoger, dentro de un número discreto, finito y excluyente de soluciones posibles, un orden de aplicabilidad. Según Barba-Romero (1987), Romero (1993) y (1994) y León y Domínguez (2002), los métodos multicriterio discretos pueden cumplir con tales condiciones.

Según Fernández Barberis (2002), las decisiones en el ámbito económico, político, financiero, tecnológico, ambiental o social, son casi siempre problemas multicriterio, no resultando sencillos de resolver tanto en los casos discretos como continuos. Usualmente no existe una solución óptima, es decir, aquella alternativa que simultáneamente sea la mejor para todos los criterios, por tal razón, la alternativa óptima cede su liderazgo a favor de la búsqueda de soluciones de compromiso.

La solución de un problema multicriterio depende también del propio decisor. Cada decisor asigna una importancia relativa diferente a cada uno de los criterios seleccionados de acuerdo con la estructura de preferencias elegida en interactividad con el analista.

La formulación de un problema multicriterio discreto puede expresarse en los siguientes términos (I):

$$\text{Máx. } \{g_1(a), g_2(a), \dots, g_k(a) / a \in A\} \quad (I)$$

Donde A es un conjunto de alternativas factibles y $\{g_j(\cdot), j = 1, \dots, K\}$ un conjunto de criterios de evaluación. De forma general se expresa como un problema de maximización, pero lo normal es que algunos criterios deban maximizarse y otros minimizarse al mismo tiempo, lo cual no representa ningún obstáculo para su consideración desde el punto de vista matemático.

Aquellas alternativas que no son dominadas se conocen como soluciones eficientes, sin embargo, la identificación de las alternativas eficientes no resuelve el problema al decisor, pues la preferencia de los criterios (pesos) resulta imprescindible en el ordenamiento de las mismas. En realidad, ningún problema multicriterio puede ser tratado adecuadamente si no se dispone de información adicional.

Muchos son los métodos que se han desarrollado para resolver este tipo de problemas. En el presente trabajo se combinan el método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), creado por Thomas L. Saaty a finales de los años 70 para la determinación de los pesos de cada criterio (Barba-Romero & Pomerol, 1997), y en una segunda fase se utiliza el *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE) I y II, categorizado dentro de los métodos de Relaciones de Superación (Fernández-Barberis, 2002) con el fin de encontrar un orden de preferencia basado en las ponderaciones obtenidas con anterioridad.

El método AHP incluye tres etapas en su metodología:

Modelización: Se construye un modelo o estructura en el que queden representados todos los aspectos considerados relevantes en el problema. Utiliza como estructura una jerarquía

en la que los elementos de un nivel no dependen de los descendientes ni de los hermanos.

Valoración: En esta etapa se incorporan las preferencias de los actores en las matrices de comparación pareada $A = (a_{ij})$, donde se reflejan la dominación relativa de un elemento frente a otro, o sea, de la alternativa i sobre la j . Las puntuaciones son asignadas según la escala de Saaty, pudiendo verificarse que $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, o sea, si el criterio i -ésimo es k veces más preferido que el criterio j -ésimo, entonces el criterio j -ésimo es $1/k$ veces más preferido que el criterio i -ésimo.

Prioridad y síntesis: Proporciona las diferentes prioridades consideradas en la resolución del problema: prioridades locales, globales y totales. Considerándose como prioridad a una unidad abstracta válida para cualquier escala en la que se integran las preferencias que el decisor tiene al comparar aspectos tangibles e intangibles.

El Método AHP presenta como limitante el subjetivismo que incorpora el centro decisor en los procesos de comparación par por par, es por ello se limitará su uso sólo en la determinación de los pesos o niveles de importancia de cada criterio, pasando a determinar las preferencias de las alternativas a través del Método PROMETHEE.

El método PROMETHEE I ofrece un ordenamiento parcial basado en el siguiente criterio (II):

$$\left\{ \begin{array}{l} a P^I b \Leftrightarrow \begin{cases} \phi_{(a)}^+ > \phi_{(b)}^+ \text{ y } \phi_{(a)}^- < \phi_{(b)}^- \\ \phi_{(a)}^+ = \phi_{(b)}^+ \text{ y } \phi_{(a)}^- < \phi_{(b)}^- \\ \phi_{(a)}^+ > \phi_{(b)}^+ \text{ y } \phi_{(a)}^- = \phi_{(b)}^- \end{cases} \\ a I^I b \Leftrightarrow \phi_{(a)}^+ = \phi_{(b)}^+ \text{ y } \phi_{(a)}^- = \phi_{(b)}^- \\ a R^I b \Leftrightarrow \text{en cualquier otro caso} \end{array} \right. \quad (II)$$

Donde P^I, I^I y R^I indican preferencia, indiferencia e incomparabilidad de acuerdo con la relación de preferencia de PROMETHEE I, $\phi_{(.)}^+$: flujo positivo o de salida y $\phi_{(.)}^-$: flujo negativo o de entrada.

Es común que con la aplicación del PROMETHEE I algunas alternativas permanezcan incomparables, el PROMETHEE II realiza un

ordenamiento completo de las alternativas, basándose para ello en el flujo de superación neto de cada una (III), expresándose de la siguiente manera:

$$\phi_{(.)} = \phi_{(.)}^+ - \phi_{(.)}^- \quad (III)$$

De esta forma PROMETHEE II define el ordenamiento completo de la siguiente manera (IV):

$$\begin{cases} a P^{II} b \Leftrightarrow \phi_{(a)} > \phi_{(b)} \\ a I^{II} b \Leftrightarrow \phi_{(a)} = \phi_{(b)} \end{cases}$$

Con este segundo método se pretende encontrar un orden de preferencia para las posibles alternativas a utilizar en el tratamiento de los suelos degradados.

Para la aplicación de ambos métodos se utilizaron los softwares Expert Choice (Método AHP) y Decision Lab (PROMETHEE).

Resultados

Caracterización del área de trabajo

A continuación se relacionan los principales problemas que se presentan en el área del polígono de trabajo según los resultados entregados por el Sistema Integrado SIMONIT en el módulo Información.

Problemas principales del área de estudio:

1. Bajo contenido de materia orgánica (MO), siendo menor de 2%, en la profundidad de 0-20 cm.
2. Alta compactación del suelo. Valores de densidad aparente (D_a) mayores de 1,35 g/cm³, en la profundidad de 0-30 cm.
3. Poca profundidad efectiva. Rango de 20 y 25 cm, donde las raíces de los cultivos encuentran dificultades para su normal crecimiento y desarrollo.

4. Acidez del suelo. Valores de pH (KCl) menores de cuatro en la profundidad de 0-20 cm.
5. Bajo índice de cubierta vegetal (Icv) de la superficie del suelo. Con valores menores de 0,45%.

De estos problemas se derivan otros como baja permeabilidad, bajo índice de aprovechamiento de los nutrientes contenidos en el suelo, bajo índice de aprovechamiento del agua, escasa actividad biológica y altas temperaturas en la capa superficial del suelo.

Alternativas a aplicar para la solución del problema

A partir de los principales problemas identificados en el polígono seleccionado, las alternativas a aplicar, según el módulo de Solución del Sistema Integrado SIMONIT, se relacionan a continuación:

1. Aplicación de materia orgánica más subsolación con multiarado.
2. Aplicación de materia orgánica con preparación normal del suelo.
3. Subsolación con multiarado sin aplicación de materia orgánica.
4. Rotación de cultivos con abonos verdes y cubierta del suelo con restos de cosecha.

5. Aplicación de encalado.

Para el polígono seleccionado, este sería el conjunto de alternativas sobre las que se debe decidir cuál escoger. Esta decisión se tomaría basándose en los diferentes criterios tenidos en cuenta, creándose un orden de preferencia de cada alternativa. Los criterios expresan indicadores técnicos, sociales y económicos y plasman los “deseos” del centro decisor.

Se resume, en una matriz de criterios-alternativas (Tabla 1), los valores esperados de cada uno de los criterios técnicos (Ve). Se incorpora además, el Ingreso Medio de los Trabajadores (Criterio Social) y los costos de aplicación, expresado en \$*ha⁻¹ (Criterio Económico).

Donde: **Ics:** Índice de calidad del suelo (Escala de 0 a 1), **Irc:** Índice de rendimiento de los cultivos (Escala de 0 a 1), **IMT:** Ingreso Medio de los Trabajadores (\$), **Icv:** Índice de cobertura vegetal (Escala de 0 a 1), **MO:** Contenido de Materia Orgánica (%), **Da:** Densidad aparente de la capa arable (g*cm⁻³) y **Costo:** Costo de aplicación de la tecnología (\$*ha⁻¹).

Para los primeros cinco indicadores se persigue maximizar los mismos y los dos restantes minimizar.

Tabla 1. Matriz de criterios-alternativas.

Descripción de las alternativas	Indicadores con su valor esperado (ve)						
	Ics Ve	Irc Ve	IMT Ve	Icv Ve	MO Ve	Da Ve	Costo (\$*ha ⁻¹)
1. Aplicación de materia orgánica más subsolación con multiarado.	0,82	0,73	3384	0,65	2,5	1,20	332,00
2. Aplicación de materia orgánica, con preparación normal del suelo.	0,79	0,67	2958	0,60	2,5	1,25	282,00
3. Subsolación con multiarado, sin aplicación de materia orgánica.	0,76	0,61	2710	0,53	1,5	1,23	50,00
4. Rotación de cultivos con abonos verdes y cubierta del suelo con restos de cosecha.	0,76	0,62	2780	0,54	2,0	1,27	60,00
5. Aplicación de encalado	0,74	0,58	2426	0,50	1,5	1,35	94,00

Fuente. Sistema SIMONIT

Al analizar la tabla 1 se puede observar que ninguna de las alternativas posee un criterio dominante sobre las demás, o sea, no existe preferencia absoluta de ninguna de las alternativas planteadas.

Cálculo de los pesos

Como se expresó con anterioridad, para el cálculo de los pesos o niveles de importancia de cada uno de los criterios se utilizó el Método AHP. La estructura jerárquica del problema se plasma en la figura 1.

El interés con este método es determinar los niveles de importancia que para el Centro Decisor (Presidencia de la Cooperativa), representan cada uno de los criterios a tomar en cuenta. Se utiliza para ello la escala presentada por Saaty (Barba y Pomerol, 1997), a través de la cual el

centro decisor volcó sus preferencias (Tabla 2).

Con esta información se procede a determinar los pesos de cada uno de los criterios, los resultados se muestran en la figura 2.

El índice de inconsistencia es igual a 0,05 (Figura 4), inferior a la cota máxima planteada por Saaty de 0,1. El Método AHP permite continuar el trabajo con las distintas alternativas con el objetivo de encontrar órdenes de preferencia, sin embargo, este proceso conlleva proseguir con las comparaciones por pares entre cada una de las alternativas en función de cada uno de los criterios, lo cual introduce un mayor índice de subjetivismo en los resultados, es por ello que se recomienda utilizar los valores de ponderación para cada indicador y pasar a una evaluación de las alternativas a través del Método PROMETHEE.

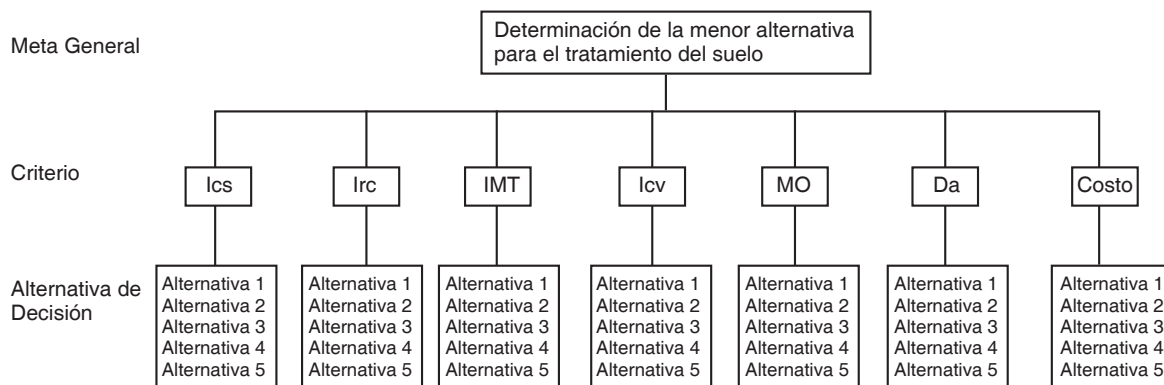
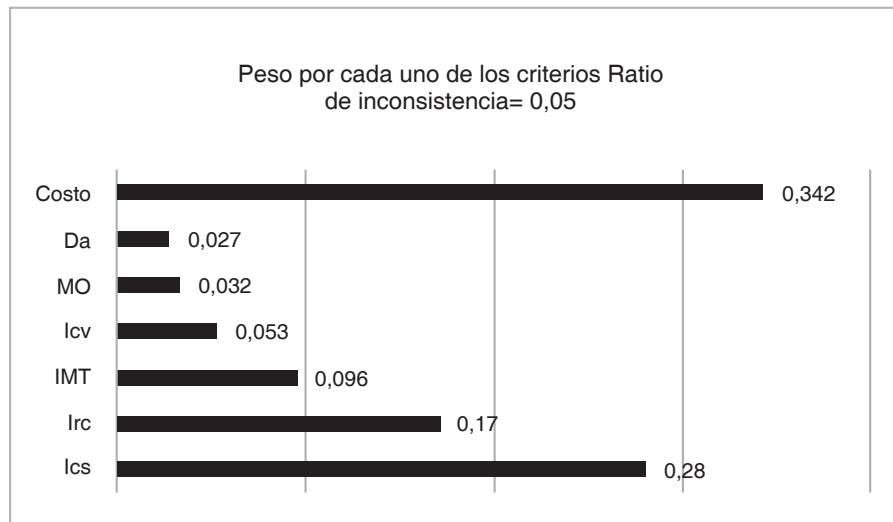


Figura 1. Estructura jerárquica del problema de selección de las alternativas.

Tabla 2. Comparación por pares de los diferentes criterios según la escala de Saaty.

Criterios	Irs	IMT	Icv	MO	Da	Costo (\$*ha ⁻¹)
Ics	3	4	5	7	9	1/2
Irs		3	4	6	7	1/3
IMT			3	4	5	1/5
Icv				2	3	1/5
MO					1	1/6
Da						1/7

Fuente. Elaboración propia.



Fuente. Elaborado con software Expert Choice.
 Figura 2. Peso de cada uno de los criterios.

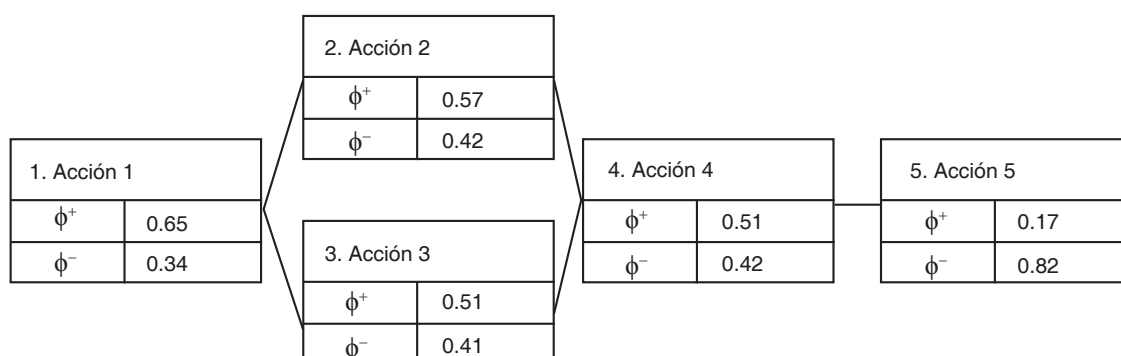
Determinación del orden de las alternativas

Un análisis usando PROMETHEE I, el cual realiza un ordenamiento parcial a partir de los Flujos de salida (ϕ_i^+) y los Flujos de entrada (ϕ_i^-), muestra el siguiente esquema (Figura 3):

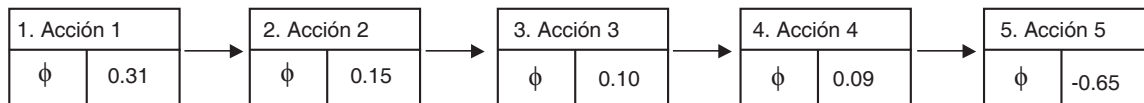
La alternativa preferida resultante de la aplicación del proceso, recae en la Alternativa 1 (Aplicación de materia orgánica más subsolación con multiarado), quedando en segundo lugar, sin que existan criterios para diferenciar las alternativas 2 (Aplicación de materia orgánica con preparación

normal del suelo) y 3 (Subsolación con multiarado sin aplicación de materia orgánica). En tercer lugar se ubica la alternativa 4 (Rotación de cultivos con abonos verdes y cubierta del suelo con restos de cosecha) y como menos viable la Alternativa 5 (Aplicación de encalado).

Es recomendable usar el Método PROMETHEE II para lograr una ordenación completa de las alternativas a partir del Flujo Neto ($\phi_i = \phi_i^+ - \phi_i^-$), de esta manera se evitan los empates entre alternativas. Los resultados obtenidos son los siguientes (Figura 4):



Fuente. Software Decision Lab
 Figura 3. Orden de preferencia al aplicar PROMETHEE I



Fuente. Software Decision Lab

Figura 4. Orden de preferencia al aplicar PROMETHEE II

Al aplicar este método se observa que se mantiene, como alternativa más preferida bajo las ponderaciones asignadas a cada criterio de selección, la Alternativa 1, presentándose un desempate entre las Alternativas 2 y 3, quedando en un segundo lugar de preferencia la Alternativa 2. El resto de las alternativas no tuvieron variaciones.

Los valores esperados en los diferentes criterios con la aplicación de esta alternativa se describen a continuación:

- Índice de calidad del suelo: 0,82 unidades.
- Índice de rendimiento de los cultivos: 0,73 unidades.
- Ingreso medio de los trabajadores: \$ 3 384,00
- Índice de cobertura vegetal: 0,65 unidades.

- Contenido de Materia orgánica: 2,5 %
- Densidad aparente de la capa: 1,20 g/cm³
- Costo: \$ 332,00/ha

También es fundamental el análisis de sensibilidad que se pueda realizar sobre los pesos de cada uno de los criterios. La siguiente salida del software Decision Lab ayuda en este sentido (Tabla 3).

Debe tenerse en cuenta que, un cambio en la valoración que el centro decisor realice en los valores de preferencia de los criterios en la comparación par por par, variará los pesos asignados a las mismas. De ahí la importancia que reviste la Tabla 3 en el análisis de hasta dónde pueden variar los pesos manteniendo los órdenes de preferencia de las alternativas.

Tabla 3. Análisis de sensibilidad del peso de los diferentes criterios.

Criterios	Pesos	Intervalo		% Pesos	% Intervalo	
		Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
Ics	0,28	0,2127	Infinity	28,00%	22,50%	100,00%
Icr	0,17	0,1195	0,1990	17,00%	12,59%	19,34%
IMT	0,096	0,0455	0,1250	9,60%	4,79%	12,15%
Icv	0,053	0,0025	0,0820	5,30%	0,26%	7,97%
MO	0,032	0,0000	0,0513	3,20%	0,00%	5,04%
Da	0,027	0,0125	0,1280	2,70%	1,27%	11,63%
Costo	0,3420	0,3130	0,3757	34,20%	32,23%	34,34%

Fuente. Software Decision Lab

Discusión

Los resultados con el empleo de PROMETHEE I y PROMETHEE II muestran a la Alternativa uno, como la opción más deseada por el centro decisor a partir de las ponderaciones otorgadas a cada uno de los criterios de evaluación.

Resulta lógica la propuesta de la aplicación con la subsolación para una mejor manifestación de las propiedades del suelo para con los cultivos, en tanto la zona de estudio muestra alta compactación del suelo, con valores de densidad aparente mayores de $1,35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, en la profundidad de 0-30 cm, unido a poca profundidad efectiva, de 20 a 25 cm, coincidiendo con la propuesta de manejo integrado de suelo de Olivares (2016) y Llanes, *et al.*, (2012). También corrobora los resultados obtenidos por Leyva, Masaguer y Baldoquin (2014) quienes expusieron una evolución positiva de la calidad del suelo con la tecnología de Labranza Sin Inversión del Prima (labor de subsolación a 30 cm), resultando una mayor cantidad de espacios porosos en toda la matriz del suelo.

En relación a la incorporación de materia orgánica, la aplicación de la alternativa uno brinda resultados positivos respecto a las propiedades del suelo y al comportamiento de los cultivos. Estos resultados son corroborados por Llanes *et al.* (2012), Esteban, Pacheco, Tapia y Bastías (2016), Soto *et al.* (2016), Tácuna *et al.* (2015) y Hernández *et al.* (2015).

Se destacan los efectos positivos del humus de lombriz tanto en suelo como en el comportamiento de los cultivo, según Mogollón *et al.* (2016), Cortes, *et al.* (2016) y Ramírez *et al.* (2015).

Otras alternativas de incorporación de fuentes orgánicas al suelo son los abonos verdes, corroborado por Valverde *et al.* (2015) y Prager, *et al.* (2012) y la rotación de cultivos, demostrada por Fernández (2015), que combinadas con cubierta del suelo con restos de cosecha, se ubica en la tercera posición en el orden de selección de las alternativas, de acuerdo a PROMETHEE

II y que puede ser valorada por parte del centro decisor como un análisis de postoptimalidad.

Como criterios a considerar en el análisis se encontraban los de interés económico y social. El primero reflejado en los costos de aplicación de la alternativa que, a pesar de recibir una alta ponderación (peso=0,3420), el impacto del resto de los criterios es lo suficientemente alto como para priorizar la alternativa con más alto costo de implementación (valor anti-ideal), lo que demuestra el tratamiento multicriterial del proceso.

El efecto social se refleja en el criterio Ingreso Medio de los Trabajadores (IMT) que, debido a los efectos positivos que conlleva la alternativa seleccionada y el peso que se le confirió (peso=0,096), cuarto en nivel de importancia, permite que la alternativa seleccionada coincida con el valor ideal en este criterio de selección.

Conclusiones

1. Los métodos para la Toma de Decisiones Multicriterio Discretas, en especial los métodos AHP (Analytic Hierarchy Process) y PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) I y II constituyen herramientas muy útiles que permiten procesar las alternativas generadas por el SIG SIMONIT y, con base en la información suministrada por el centro decisor sobre los niveles de prioridad de los diferentes criterios, llegar a conclusiones sobre las prioridades de aplicación de cada una de las alternativas de solución.
2. La aplicación de SIMONIT y los métodos multicriterio en su conjunto a la Cooperativa de Producción Agropecuaria 17 de Mayo, generó como solución más deseada la "Subsolación con multiarado, con aplicación de materia orgánica". Variaciones en los niveles de importancia de los criterios utilizados (pesos) puede conllevar variaciones en los órdenes de preferencia si se sobrepasan los umbrales emitidos por el análisis de sensibilidad.

Referencias bibliográficas

- Barba-Romero, S. (1987) Panorámica actual de la decisión multicriterio discreta. *Investigaciones Económicas*, XL, 2. España.
- Barba-Romero, S., & Pomerol, J-C. (1997) Decisiones Multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica. *Colección de Economía*. Servicios de publicaciones. Universidad de Alcalá. España.
- Cortes, L.E.; Bravo, I.S., Martin, F. J. & Menjivar, J.C. (2016). Extracción secuencial de metales pesados en dos suelos contaminados (Andisol y Vertisol) enmendados con ácidos húmicos. *Acta Agron.* 65(3), 232-238. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n3.44485>
- Covarrubia, S. A., García, J.A., & Peña, J.J. (2015). El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Univesitaria*. 25(3), 40-45. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Sergio_Hernandez26/publication/283616364 doi:10.15174/au.2015.907
- Díaz, S., & Oliveros, A. (2014). La relación sociedad- naturaleza vista a través de la distribución geográfica de los suelos de Cuba. *Novedades En Población*, 7 (13).
- Esteban, W.; Pacheco, P.; Tapia, L. y Bastías, E. (2016). Remediation of salt and boron-affected soil by addition of organic matter: an investigation into improving tomato plant productivity. *IDESIA*. 34 (3), 25-32
- Fernández Barberis, G.M. (2002) Los métodos PROMETHEE: Una metodología de ayuda a la toma de decisiones multicriterio discreta. *Revista Rect@ Series Monografías*. Ed Tirant lo Blanch. (1), 5-20 Valencia, España.
- Fernández, M.P. (2015). *Eficiencia del uso del agua en las rotaciones de cultivo según el sistema de laboreo*. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias. Universidad de Córdoba. España.
- Hernández, C., Bernal, Y., Ríos, C., Muñoz, P. y González, O. (2015). Evaluación de manejo conservacionista en suelo Pardo Grisáceo. *Centro Agrícola*. 42(3), 25-33
- IUSS Working Group WRB (2015). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports 106*. FAO, Rome. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>.
- Jozi, S. A. & Ebadzadeh, F. (2014) Application of multicriteria decision making in land evaluation of agricultural land use. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*. 42 (2), 363-371.
- León, M.A., & Dominguez, F. (2002). Modelo de Decisión Multicriterio Discreto en la selección de alternativas de aprovechamiento de la madera. *Revista Rect@ Series Monografías*. Ed Tirant lo Blanch, (1), 211-226, Valencia, España.
- Leyva, S. L., Masaguer, A., & Baldoquin, A. (2014). Efecto de sistemas de labranza en luvisoles dedicados a la producción de pastos. *Pastos y Forrajes*, 37(4), 408-412.
- Llanes, J.M., Cabrera, E., Otero A., & Domínguez, D. (2012). Manejo integrado del suelo para la producción sostenible de tabaco en San Luis. *Revista Electrónica Avances*. 14(3), 251-258.
- Mogollón J.P., Martínez, A.E., & Torres D.G. (2016). Efecto de la aplicación de un vermicompost en las propiedades químicas de un suelo salino-sódico del semiárido venezolano. *Bioagro*, 28(1), 29-38
- Muñiz, O. (2010). *La cartografía se suelos en Cuba*. En: Taller Regional "Atlas de Suelos Latinoamericano", Río de Janeiro, 6 al 10 septiembre. Recuperado de http://eu soils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/LatinAmerica_Atlas/Meeting2010/08Sep/18_CUBA.pdf
- Olivares, B.O. (2016). Descripción del manejo de suelos en sistemas de producción agrícola del sector Hamaca de Anzoátegui Venezuela. *LA GRANJA*. 23(1), 14-24. DOI:10.17163/lgr.n23.2016.02
- Pourkhabbaz, H.R., Javanmardi, S., Yavari, A.R. Sabokbar, H.F. (2013) Application of multi criterial decision making method and the integrated ANP-DEMATEL model for agricultural land suitability analysis

- (Case study: Qazvin Plain) *Journal of Environmental Studies*. 39 (3), 34-36.
- Prager, M., Sanclemente, O.E., Sánchez de Prager M., Gallego, J.M., & Ángel, D.I. (2012). Abonos verdes: Tecnología para el manejo agroecológico de los cultivos. *Agroecología*. (7), 53- 62. Recuperado de <http://revistas.um.es/agroecologia/article/view/170991>
- Ramírez, J. F., Fernández, Y., González, P.J., Salazar, X., Iglesias J.M., & Olivera, Y. (2015). Influencia de la fertilización en las propiedades físico-químicas de un suelo dedicado a la producción de semilla de *Megathyrsus maximus*. *Pastos y Forrajes*, 38(4): 393-402
- Riverol, M., Peña, F., Cabrera, E., Llanes, J.M., Hernández, C., León G., & Aguilar, Y. (2004). *Sistemas de medidas para el control de la erosión en dos agroecosistemas frágiles de Cuba*. En: Memoria del XV Congreso Latino Americano y V Cubano de la Ciencia del suelo, Noviembre 11-16, Varadero, Cuba.
- Romero, C. (1993). *Teoría de la decisión multicriterio: Conceptos técnicos y aplicaciones*. Alianza Editorial S.A. Madrid, España.
- Romero, C. (1994) *Economía de los recursos ambientales y naturales*. Alianza Editorial S.A. Madrid, España.
- Soto, J. M., Piña, F.J., Sánchez, E., Pérez, R., & Basurto, M. (2016). Alternativas orgánicas para disminuir la aplicación de nitrógeno en nogal pecanero. *Nova Ciencia*. 8(16), 140-161. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203345704009>
- Tácuna, R. E., Aguirre, L. & Flores, E. R. (2015). Influencia de la revegetación con especies nativas y la incorporación de materia orgánica en la recuperación de pastizales degradados. *Ecología Aplicada*, 14 (2), s/p
- Valverde, F., Alvarado, S.P., Chancosa, C., Viana, A., & Parra, R. (2015). Evaluación del efecto de abonos verdes en la calidad del suelo, en Imantag, Imbabura [Resumen]. Ponencia presentada en Memorias del I Simposio Internacional "El Suelo y la Nutrición de Cultivos en Ecuador" (s.p.). Guayaquil, Ecuador: INIAP.
- Velazquez, M. & Hester, P. T. (2013) An analysis of multicriteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10 (2), 55-66.
- Widiatmaka, W., Ambarwulan, W., & Sudarsono, S. (2016) Spatial multicriteria decision making for delineating agricultural land in Jakarta Metropolitan area's hinterland: Case study of bogor regency West Java. *Agrivita Journal of Agricultural Science*, 30 (2), 105-115.