

Modelo multiatributos para selección de tractores agrícolas: un estudio de caso*

A multiattribute model for selection of agricultural tractors: a case study

Modele multiattributs pour la selection de tracteurs agricoles : une etude de cas

Jorge-Luis García-Alcaraz**

Juan Luis Hernández Arellano***

* Este artículo es el resultado del proyecto de investigación “Sistema experto para toma de decisiones” del programa de de Ingeniería industrial de la Universidad Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

** Doctor en Ciencias en Ingeniería Industrial. Profesor investigador Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura. Instituto de Ingeniería y Tecnología. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Del Charro 450. Col. Universidad. Ciudad Juárez, Chihuahua, México Tel: (+52 656) 688 – 4843. Correo electrónico: jorge.garcia@uacj.mx

*** Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial. Profesor Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad Autónoma de Cd. Juárez. Correo electrónico: juan_hernanmx@yahoo.com.mx

Resumen

En este artículo se presenta un modelo multicriterio y multiatributos, para evaluar tractores agrícolas, que integra tanto atributos cualitativos como cuantitativos, dado que los modelos tradicionales no incluyen estos últimos. Para la determinación de los atributos, se realizó una encuesta a productores agrícolas y vendedores de maquinaria agrícola. Se determinó, mediante técnicas de grupo nominal, que los más importantes son solamente siete, los cuales se integraron en la técnica TOPSIS para generar el modelo, el cual fue aplicado a varios casos de estudio de selección de tractores, en los que participaron grupos de decisión integrados por productores agrícolas. Se concluyó que el modelo es eficiente, fácil de aplicar y tiene amplia aceptación por parte de productores agrícolas.

Palabras clave autores: transferencia de tecnología, modernización agrícola, justificación tecnológica, inversión en tractores, TOPSIS, evaluación multicriterio, justificación multiatributos.

Palabras clave descriptores: Productividad agrícola, transferencia de tecnología, inversiones agrícolas, tractores, aspectos económicos

Abstract

In this article appears a multicriteria and multiattribute model for evaluate agricultural tractors, that integrate qualitative and quantitative attributes, due that traditional model does not include the last one. For determination of the attributes, a survey was applied to agricultural machinery salesmen and farmers. We find using nominal group technique that only seven attributes were most important in acquisition process and they were integrated in TOPSIS technique. The model was applied to several cases of study of selection tractors in which a group decision was participating; one of these is exposed. On the basis of obtained results of its application, we conclude that the model is efficient, easy to apply and has acceptance.

Key words author: Technology transfer, agricultural modernization, technological justification, investment in tractors, TOPSIS, multicriteria evaluation, multiattribute justification.

Key words plus: Agricultural Productivity, Technology Transfer, Agricultural Investment, Tractors, Economic Aspects.

Résumé

Dans cet article nous présentons un modèle multicritères et multiattributs pour évaluer les tracteurs agricoles basé sur la technique TOPSIS qui intègre des aspects qualitatifs et quantitatifs. La détermination des attributs s'est faite suite à une enquête auprès des producteurs agricoles et des vendeurs de matériel agricole. Les techniques du groupe nominal ont permis de déterminer que seuls sept attributs étaient importants. Ce modèle auquel ont participé les groupes de décision a été appliqué à plusieurs cas d'étude de sélection de tracteurs. Ce modèle s'est révélé efficient, facile à appliquer et a été largement accepté par les producteurs.

Mots clé: Transfert de technologie, modernisation agricole, justification technologique, investissement en tracteurs, TOPSIS, évaluation multicritères, justification multiattributs.

Introducción

En la actualidad los altos estándares de calidad y bajo costo son demandados en los productos y subproductos agrícolas, por lo que estas características son objetivos estratégicos de las empresas agroindustriales y pequeñas granjas en el norte de México, especialmente en el fronterizo Estado de Chihuahua, las cuales tienen varias opciones para alcanzarlos y mantenerse en el ambiente dinámico de mercado de estos tiempos de globalización (Alagarswamy, 2010; Lazzari & Mazzetto, 1996). Una de las acciones más comunes es la inversión en tecnología avanzada (TA) para implantar en los sistemas de producción, así como para el procesamiento e industrialización.

Sin embargo, frecuentemente, una vez que los directivos de las agroindustrias o productores agrícolas han tomado la decisión de invertir en TA, éstos se enfrentan a muchos otros tipos de problemas al momento de realizar la selección de ésta, ya que actualmente existen muchas alternativas de solución en el mercado, son muchos los atributos que caracterizan a las TA y existen demasiadas técnicas de evaluación tecnológica (Carletto et al., 2010; Currit & Easterling, 2009; Lal et al., 1997).

Las alternativas de compra de tractores

En relación con las diferentes alternativas de compra para los productores agrícolas, en México, existen muchas empresas distribuidoras de tecnología extranjera, las cuales ofrecen diferentes ventajas para cada uno de los tipos de relieves y suelo que existen en el país.

Los atributos

En el caso específico de los atributos de evaluación para inversiones en TA, se acepta que existen dos tipos: los primeros se denominan atributos objetivos, los cuales son medidos generalmente en términos numéricos y representan características de costos e ingeniería de la tecnología evaluada; por ejemplo, el costo o inversión inicial, consumo de energéticos (diesel, lubricantes) y costo de refacciones. Por otro lado, los atributos subjetivos se refieren a características no cuantificables y para su determinación se requiere de juicios de personas expertas en el área, quienes valoran la presencia de los atributos en las alternativas con base en una escala, generalmente Likert (Braglia & Gabbrielli, 2000; Chuu, 2010; Gutjahr et al., 2009; Parkan & Wu 1998). Ejemplo de atributos subjetivos son la calidad del servicio postventa y la seguridad ofrecida al operador.

Las técnicas de evaluación

Con respecto a las técnicas de evaluación de tecnología, éstas se dividen en económicas, estratégicas y analíticas (Amiri, 2010; Chan et al., 2001; Hofmann & Orr, 2005), las que se exponen brevemente a continuación.

Las técnicas económicas

Las técnicas económicas (TE) representan la práctica industrial y agrícola en el Estado de Chihuahua; sin embargo, son ampliamente criticadas por muchos autores por no integrar aspectos cualitativos en el análisis y sus modelos son calificados como ineficientes y reduccionistas, ya que no representan la totalidad del problema de inversión y selección de tecnología, algunos ejemplos de estas técnicas son: Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), Periodo de Retorno y Análisis Costo/Beneficio.

Las técnicas estratégicas

Con respecto a las técnicas estratégicas (TS), éstas se basan en los objetivos y misión de la empresa; sin embargo, son criticadas por no integrar aspectos económicos en la evaluación. Las TS son poco usadas por los productores agrícolas en México y es debido a que éstas en su mayoría son pequeñas empresas, mismas que no tienen claramente definida una estructura organizacional y frecuentemente carecen de misión y visión formal.

Las técnicas analíticas

Por último, las técnicas analíticas son poco conocidas, pero tienen la ventaja de poder integrar en la evaluación aspectos económicos, estratégicos, sociales y tecnológicos, por lo que se recomienda ampliamente su uso, debido al aspecto integrador que tienen. Algunas de estas técnicas son: Proceso de Jerarquía Analítica (*Analytic Hierarchy Process*, AHP), Análisis Dimensional (AD), TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) y Modelo Lineal Aditivo (MLA).

Las aplicaciones de las técnicas

Las aplicaciones industriales de los tres tipos de técnicas expuestas anteriormente, son ampliamente reportadas en la literatura en los que se han

evaluado robots industriales que se integran a procesos de producción, células de manufactura, sistemas flexibles de producción y otros. Por ejemplo, se ha propuesto una metodología económica que incorpora varios costos en la evaluación (Knott & Gretto, 1982); otros han empleado métodos auxiliados por computadora para justificar manipuladores industriales (Offodile et al., 1997; Wei et al., 1992); se han propuesto técnicas de programación por metas (Imany & Schlesinger 1989); se ha desarrollado un sistema experto (Boubekri et al., 1991); y, recientemente, se han propuesto modelos multicriterio basados en TOPSIS (García et al., 2005a, García et al., 2005b); otra técnica multicriterio usada en la evaluación de tecnologías ha sido AHP (Theodorou & Florou, 2008); y, algunas veces, se han usado técnicas multicriterio en combinación con lógica difusa (Chang & Wang, 2009).

Las aplicaciones de técnicas cuantitativas en la evaluación de TA aplicada a la agricultura, son muchas y con diferentes enfoques; por ejemplo, se han realizado simulaciones estocásticas para evaluar maquinaria trituradora de forraje (Russell, 1983); se ha generado una ecuación para inversiones en maquinaria basada en la disposición de terreno e infraestructura (Elhorst, 1993); otros han propuesto un modelo no lineal para determinar el límite de la inversión, en procesos de mecanización agrícola (Sogaard & Sorensen, 2004); y, por último, se ha propuesto un modelo de programación lineal entera mixta, para evaluación de maquinaria agrícola (Camarena et al., 2004). Sin embargo, las evaluaciones anteriores hacen uso solamente de factores cuantitativos, ignorando características de tipo cualitativo de la tecnología avanzada en agricultura (TAA).

De la misma manera, la aplicación de técnicas multiatributos en procesos de evaluación y selección de tecnologías agrícolas es ampliamente difundida. Por ejemplo, se han realizado estudios para analizar la aversión al riesgo de inversiones en agricultura con un enfoque multiatributos (Gómez-Limón et al., 2003); se ha propuesto un modelo para evaluación de diferentes diseños de sistemas de irrigación (Basan, 2005); y, recientemente, se ha realizado un análisis del impacto de las políticas del uso de agua en la agricultura con un enfoque multiatributos y programación lineal (Bartolini et al., 2007).

Cabe señalar que de las aplicaciones anteriores se puede observar que no todas las técnicas aplicadas son puras y muchas de éstas son una combinación de dos o más, por lo que se denominan técnicas híbridas.

El problema

Con base en lo anteriormente señalado, y los diferentes enfoques con que ha sido abordado el problema de inversiones en tecnología agrícola, se puede decir

que éste es un problema complejo, no definido o estructurado, y los enfoques tradicionales (cuantitativos, generalmente) consideran en el análisis solamente aspectos operativos y económicos, lo cual es debido principalmente al amplio rigor financiero que imponen las instituciones crediticias en México. Además, este tipo de evaluación financiera es realizada por una sola persona, la cual debe tener amplios conocimientos contables, por lo que este proceso de evaluación queda frecuentemente en manos de terceros (principalmente contadores), quienes desconocen las necesidades tecnológicas de los productores agrícolas.

Así, se puede decir que los modelos económicos tradicionales son poco integradores de las evaluaciones que puede emitir un productor agrícola en relación con atributos de carácter subjetivo, por lo que éste se siente relegado del proceso de evaluación. Y no solo eso, sino que en México la adquisición de tecnología, frecuentemente, es realizada por integrantes de asociaciones de producción, tales como cooperativas de producción agrícola o ejidatarios, quedando así todo un grupo excluido del proceso de análisis y toma de decisiones.

El objetivo

Ante las deficiencias de los modelos económicos tradicionales, el objetivo de este artículo es presentar un modelo multiatributos basado en la técnica TOPSIS, la cual, como técnica multiatributos, permite integrar atributos cualitativos y cuantitativos, y ser aplicado por un grupo de decisión integrado por productores agrícolas, quienes emiten sus opiniones y experiencias propias. Así, se busca proporcionar al productor agrícola o gerente de agroindustrias una herramienta más, para la evaluación de sus inversiones tecnológicas, que constituye un complemento al análisis económico que se realiza ante las instituciones crediticias y financieras.

Así pues, se pretende ilustrar de manera sencilla, paso a paso, el procedimiento para realizar la evaluación, que puede ser realizada en una hoja de cálculo de Excel, en la que no se requieren grandes conocimientos de informática, por lo que pueden ser evaluadores los propios PA. Además, el modelo puede ser aplicado a cualquier otro tipo de análisis en que se evalúe cualquier tipo de tecnología, una vez que ésta sea caracterizada en sus atributos.

El artículo está organizado de la siguiente manera: después de esta introducción, en la segunda sección se exponen los materiales y métodos seguidos para la generación del modelo, la tercera sección se refiere a los resultados de un caso de estudio y, por último, se dan una serie de conclusiones basadas en los resultados de la aplicación del modelo.

Materiales y métodos

Para la evaluación objetiva de TAA se procedió a diseñar un cuestionario con la finalidad de identificar los diferentes atributos que caracterizan a los tractores agrícolas, el cual fue aplicado a productores y vendedores de maquinaria agrícola. El cuestionario constó de veinte atributos que fueron obtenidos de reportes de literatura, y fue validado por docentes expertos en el tema, los productores y vendedores de maquinaria. Los atributos comprendían cinco rubros genéricos de características del tractor, los cuales se subdividían en otros más específicos, que aparecen en el Cuadro 1.

Cuadro 1				
Costo	Seguridad	Calidad	Beneficios	Implementos
Costo Inicial	Para el operador	Servicio	Velocidad en las operaciones	Variedad de implementos
Mantenimiento	Al realizar cambio de implementos	Marca	Rendimiento por hora de trabajo	Facilidad para adaptarlos
Energeticos por hora trabajada	Interfases de Seguridad	Motor	Potencia del motor	Existencia en el mercado
Refacciones	Acceso a dispositivos de Seguridad	Refacciones	Comodidad	Rapidez para realizar los cambios

Fuente: elaboración del autor.

Atributos evaluados en el cuestionario

El cuestionario se aplicó a una muestra de doscientos treinta y ocho productores de diferentes productos agrícolas y quince agentes de ventas de tecnologías agrícolas del Estado de Chihuahua, México, mediante el cual se buscó determinar los niveles de importancia que los encuestados asignaban a cada uno de los veinte atributos al momento de realizar la compra de algún tractor. La asignación se realizó de manera subjetiva en una escala Likert, con valores entre uno y cinco, donde el uno representaba una importancia nula del atributo y el cinco, la importancia extrema.

En los principios de inclusión de la muestra de PA se requería que los encuestados hubieran estado en posesión de un tractor agrícola por al menos dos años, y que éstos hubieran participado en su proceso de adquisición. En relación con los vendedores de TAA, éstos deberían de tener al menos dos años de experiencia en ventas. Para la generación del listado de encuestados se hizo uso de una base de datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - INEGI.

Para la encuesta aplicada a los PA, se acudió a diferentes dependencias gubernamentales en las que éstos realizan algún tipo de trámites, tales como la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación - SAGARPA y los Distritos de Desarrollo Rural - DDR, donde se realizaba el llenado del cuestionario con ayuda del encuestador. Para el caso de los vendedores de TAA, se acudió a las direcciones físicas de sus establecimientos comerciales y se dieron las instrucciones de llenado, regresando dos días después por el cuestionario, dado que son personas con múltiples ocupaciones, se buscó no interferir con sus horas de trabajo.

La información obtenida por medio de los cuestionarios fue capturada para su análisis en el software estadístico denominado SPSS 16 y dado que se tenían veinte atributos, se buscó reducir su cantidad e integrar, en el modelo de decisión, solamente aquellos que fueran más importantes para el grupo de decisión, por lo que se realizó una lista de todos los atributos con sus medidas de tendencia central y de dispersión y se presentó al grupo de decisión que mediante la técnica de grupo nominal (TGN) identificó aquellos que eran más importantes para su caso. Se decidió usar la TGN debido a que es muy sencilla de aplicar y fácil de entender por los integrantes del grupo de decisión, por encima de otras técnicas como análisis factorial, la cual está basada en eigenvalores de una matriz de correlaciones o varianzas.

Con los atributos más importantes ya establecidos, se procedió a integrarlos en la técnica TOPSIS, la cual es una técnica basada en la distancia que existe entre dos puntos en el espacio euclidiano, concepto que es relativamente fácil de entender y aplicar por parte de los usuarios que no tienen un nivel académico elevado, lo cual es una ventaja sobre otras técnicas, tales como AHP (*Analityc Hierarchy Process*) que está basada en análisis de Eigenvalores y Eigenvectores o con DEA (*Data Envelopment Analysis*) que se basa en principios de optimización y programación lineal, los cuales son conceptos más profundos (Low & Seetharaman, 2004; Shepetukha & Olson, 2001; Thakur & Jain, 2008).

La técnica TOPSIS se expone a continuación; pero antes, con la finalidad proporcionar un marco referencial sobre la misma, en los siguientes párrafos se expone un enfoque matricial de la toma de decisiones, dado que la técnica aquí analizada se basa en éste.

Enfoque matricial para toma de decisiones

Dado que se buscó resolver el problema de selección agrícola aquí expuesto con un enfoque multiatributos, se hace una introducción a la toma de decisiones mediante un enfoque matricial.

Los atributos

Supóngase en forma genérica que J atributos objetivos y L atributos subjetivos se han identificado en relación con el problema de selección de k alternativas de tractores. Los J atributos objetivos son denotados por X_1, X_2, \dots, X_J y los L atributos subjetivos se identifican por $X_{J+1}, X_{J+2}, \dots, X_{J+L}$ (Parkan & Wu, 1998). Los valores de los atributos objetivos para el proceso de selección son generalmente proporcionados por el fabricante de la TAA. Esos valores generan una matriz de valores objetivos (VO) y están representados en la ecuación (1).

Los valores de los atributos subjetivos para la selección de la TAA son obtenidos por calificaciones emitidas por el grupo de decisión. Supóngase que P PA concedores de la TAA son quienes realizarán la compra del nuevo tractor, por lo que ellos deben calificar las k alternativas con respecto a cada uno de los atributos subjetivos. Estos PA conforman el grupo de decisión (GD). Se sugiere que los P elementos del GD valoren la aportación de la alternativa respecto a los L atributos subjetivos mediante un número entero, entre un mínimo y un máximo, usualmente una escala Likert con valores entre uno y nueve; el uno representa la ausencia del atributo en la alternativa y el nueve la excelencia. Una matriz de valores subjetivos (VS) es construida por cada integrante, tal como se indica en (2) (García et al., 2005a).

$$VO = \begin{matrix} A^1 \\ A^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A^k \end{matrix} \begin{bmatrix} X^1_1 & X^1_2 & \cdot & \cdot & X^1_J \\ X^2_1 & X^2_2 & \cdot & \cdot & X^2_J \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X^k_1 & X^k_2 & \cdot & \cdot & X^k_J \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde X^k_j es el valor del atributo j para la TAA A^k para $k=1, \dots, K$ y $j=1, \dots, J$.

$$VS^p = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_K \end{matrix} \begin{bmatrix} X^{1P}_{J+1} & X^{1P}_{J+2} & \cdot & \cdot & X^{1P}_{J+L} \\ X^{2P}_{J+1} & X^{2P}_{J+2} & \cdot & \cdot & X^{2P}_{J+L} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X^{KP}_{J+1} & X^{KP}_{J+2} & \cdot & \cdot & X^{KP}_{J+L} \end{bmatrix} \quad \text{para } p=1, 2, \dots, P \quad (2)$$

Las P matrices VS^p que proveen los P integrantes del GD se suman término a término, generando una matriz total, en la cual se divide cada uno de sus elementos por el valor P , obteniéndose la media aritmética de cada elemento, la cual representa el juicio promedio con que se ha calificado a una alternativa en relación a un atributo. Se asume que los P PA son racionales y lógicos en su juicio. Así, la matriz de valores subjetivos total, denominada VST , se determina mediante (3).

$$VST = \sum_{p=1}^P VS^p / P = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_K \end{matrix} \begin{bmatrix} X^1_{J+1} & X^1_{J+2} & \dots & X^1_{J+L} \\ X^2_{J+1} & X^2_{J+2} & \dots & X^2_{J+L} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X^K_{J+1} & X^K_{J+2} & \dots & X^K_{J+L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde $x^k_{J+l} = \frac{\sum_{p=1}^P x^{kp}_{J+l}}{P}$ para $k=1, \dots, K, l=1, \dots, L$ es la calificación promedio de los P expertos para A^k con respecto al atributo subjetivo X_{J+l} .

$$MDF = [VO, VST] = \begin{matrix} A^1 \\ A^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A^K \end{matrix} \begin{bmatrix} x^1_1 & \dots & x^1_J & x^1_{J+1} & \dots & x^1_{J+L} \\ x^2_1 & \dots & x^2_J & x^2_{J+1} & \dots & x^2_{J+L} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x^K_1 & \dots & x^K_J & x^K_{J+1} & \dots & x^K_{J+L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Combinando la matriz de valores objetivos y la de valores subjetivos, se construye la matriz de decisión final (MDF) para el problema del proceso de decisión analizado, tal como se ilustra en la ecuación (4).

Con la información contenida de manera matricial, se procede a aplicar la técnica TOPSIS, que se expone a continuación.

TOPSIS

Esta técnica considera a las alternativas A^k y atributos X_i como vectores en el espacio euclidiano, según lo indican las ecuaciones (5) y (6), partiendo del

supuesto de que existe una alternativa que debe ser mejor o peor a todas las demás; así, a la alternativa con las mejores y peores características nominales en los atributos, se le llama alternativa ideal (A^+) e anti-ideal (A^-), respectivamente, según ecuaciones (7) y (8) (Yoon, 1980). A^+ y A^- son alternativas generadas a partir de los datos contenidos en la matriz de decisión final y no son reales, son hipotéticas.

$$A^k = (x_1^k, \dots, x_n^k) \text{ para } k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^k) \text{ para } n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$A^+ = (x_1^+, x_2^+, \dots, x_n^+) \quad (7)$$

$$A^- = (x_1^-, x_2^-, \dots, x_n^-) \quad (8)$$

Con base en lo anterior, considerando que las alternativas son puntos en el espacio euclidiano, se puede decir que se debe elegir aquella alternativa en evaluación que tenga una pequeña distancia a la alternativa ideal o bien, que tenga una gran distancia a la anti-ideal. TOPSIS es una técnica que integra ambos conceptos de cercanía a la ideal y lejanía a la anti-ideal.

La técnica TOPSIS puede ser resumida en las tres etapas siguientes:

1. Normalizar cada vector X_i de los atributos que son sujetos a evaluación, según la ecuación (9), generando un vector adimensional.

$$K_i = X_i / \|X_i\| = (x_i^1 / \|X_i\|, \dots, x_i^k / \|X_i\|) \quad (9)$$

donde $\|X_n\|$ representa la norma euclidiana del vector (magnitud). Una forma de normalizar los vectores de las alternativas de manera directa es usando las ecuaciones (10), (11) y (12). La ecuación (10) se aplica a todas las alternativas en evaluación y la (11) y (12) a la alternativa ideal e anti-ideal, respectivamente.

$$TA^k = (t^k, \dots, t_n^k) = (x_1^k / \|X_1\|, \dots, x_n^k / \|X_n\|) \quad (10)$$

$$TA^+ = (t^+, \dots, t_n^+) = (x_1^+ / \|X_1\|, \dots, x_n^+ / \|X_n\|) \quad (11)$$

$$TA^- = (t^-, \dots, t_n^-) = (x_1^- / \|X_1\|, \dots, x_n^- / \|X_n\|) \quad (12)$$

2. Calcular según las ecuaciones (13) y (14), las distancias que existen de los puntos representados por cada A^k con los puntos que representan a A^+ y A^- .

$$\rho(A^k, A^+) = \|w^*(TA^k - TA^+)\| = \sqrt{\sum_{n=1}^N w_n^* (t_n^k - t_n^+)^2} \quad (13)$$

$$\rho(A^k, A^-) = \|w^*(TA^k - TA^-)\| = \sqrt{\sum_{n=1}^N w_n^* (t_n^k - t_n^-)^2} \quad (14)$$

Donde w representa la ponderación o importancia que los elementos del grupo de decisión han proporcionado al atributo de evaluación. En este modelo, se recomienda emplear la metodología de ponderación de asignación directa (Goh et al., 1996; Parkan & Wu, 1998), donde se solicita al GD que emita sus juicios sobre la importancia que tiene para cada uno de ellos los atributos evaluados, que se realiza en una escala Likert con valores comprendidos entre uno y nueve, donde el uno representa una importancia nula y el nueve indica una importancia extrema. Las calificaciones obtenidas por cada uno de los atributos son promediados, según (15). El peso o ponderación (w) asignada a cada atributo es el promedio de dicho atributo entre la suma total de los promedios, según (16); de esta manera, la suma de las ponderaciones asignadas al conjunto de atributos es igual a la unidad, como lo indica (17).

$$\bar{O}_i = \frac{\sum_{R=1}^P O_{iR}}{P} \quad \text{Para } R=1, 2, \dots, P \quad (15)$$

$$w_i = \frac{\bar{O}_i}{\sum_{i=1}^N \bar{O}_i} \quad \text{Para } i=1, 2, \dots, N \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad (17)$$

donde:

O_{iR} es juicio emitido por el experto R para el atributo i

\bar{O}_i es el promedio de las asignaciones obtenida por el atributo i

w_i es la ponderación para el atributo i

N es el número total de atributos

P es el número de expertos que emiten su juicio

3. Ordenar las k alternativas de acuerdo a la cercanía y lejanía que tienen los puntos que las representan, con los puntos de A^+ y A^- , lo cual está dado por el índice que se obtiene mediante (18). El criterio de selección que se usa en TOPSIS consiste en elegir la alternativa que contenga el menor valor en $RC(A^k, A^+)$.

$$RC(A^k, A^+) = \frac{\rho(A^k, A^+)}{\rho(A^k, A^+) + \rho(A^k, A^-)} \quad (18)$$

Por último, con la finalidad de realizar un análisis de sensibilidad de la técnica, se recomienda que se realice otro análisis en el que se excluyan los valores extremos de las opiniones de los expertos, por lo que los valores máximos y mínimos, deben eliminarse (Goh et al., 1996). Así, se tenían dos matrices de decisión final, la primera contenía los valores extremos de las opiniones de los expertos para la estimación de los atributos subjetivos (AIVE, análisis incluyendo valores extremos) y el segundo los excluye (AEVA, análisis excluyendo los valores extremos). De la misma manera, la estimación de la ponderación se obtuvo de las opiniones que tenían los expertos en relación con la importancia que éstos asignaban al atributo, por lo que se realizó el mismo procedimiento que para la estimación de los valores subjetivos, se estimó una ponderación AIVE y otra AEVE. Así, se realizaron cuatro análisis, uno para una matriz de decisión y ponderación $AIVE-w_{AIVE}$, otro para $AIVE-w_{AEVE}$, uno para $AEVE-w_{AIVE}$ y, por último, uno para $AEVE-w_{AEVE}$.

Para este caso específico, el GD colectó información de seis alternativas de compra de cuatro marcas diferentes y que podían ajustarse a su presupuesto, las cuales en lo sucesivo se denotan por $A^1 \dots A^6$ (se omiten nombres comerciales por respeto a los proveedores de maquinaria agrícola), las que fueron analizadas.

Resultados y discusión

Antes de integrar los atributos en la técnica TOPSIS, se procedió a determinar los atributos que debían integrarse en cada uno de los casos. Esto fue debido a que cada uno de los casos en que se hizo uso del modelo propuesto era diferente, debido principalmente a que cada grupo de agricultores tenía necesidades tecnológicas diferentes. En el Cuadro 2, se exponen los descriptivos de los veinte atributos evaluados.

Se puede observar que los dos primeros lugares los ocupan conceptos de costo, los relacionados con las refacciones y los costos de mantenimiento y, en seguida, el tercer lugar es ocupado por un aspecto de calidad, la reputación de la marca del tractor. De la misma manera, se puede constatar que los últimos lugares corresponden al costo inicial, la potencia del motor y la seguridad del operador al realizar maniobras con el tractor.

Cuadro 2.
Estadísticos descriptivos de los atributos

Atributo	Media	Desviación Estándar
Costo de refacciones	4.9039	0.9492
Costo de mantenimiento	4.8824	1.3419
Reputación de la marca	4.7924	0.5749
Acceso a dispositivos de Seguridad	4.7455	1.2267
Comodidad	4.4277	0.5571
Calidad de servicio	4.4275	1.2166
Seguridad al realizar cambio de implementos	4.3613	1.3921
Rapidez para realizar los cambios de implementos	4.1983	1.0060
Calidad de refacciones	4.1096	1.2226
Interfases de Seguridad	4.0737	1.1712
Tipo de Motos	4.0578	0.7878
Rendimiento por hora de trabajo	3.8348	1.2990
Velocidad en las operaciones	3.5156	1.0626
Existencia de implementos en el mercado	3.4074	0.9474
Variedad de implementar los implementos	3.3976	1.0139
Facilidad para adaptar los implementos	3.3663	1.3455
Costo de energeticos por hora trabajada	3.3119	0.5955
Costo inicial	3.3085	0.5696
Potencia del motor	3.2709	1.1330
Seguridad para el operador	3.0382	0.5969

Fuente: elaboración del autor.

Estudio de caso

Un grupo de agricultores desea adquirir un nuevo tractor para sus actividades de labranza, por lo que se procedió a aplicar el modelo basado en TOPSIS. Se presentó al GD la lista de atributos con sus estadísticos descriptivos, para que generaran una idea de los niveles e importancia que tenía en la muestra que había respondido la encuesta. Se aplicó la TGN, y el GD determinó que los atributos más importantes para su caso en particular eran: el costo inicial del tractor (*CI*, \$), costo de mantenimiento anual (*CM*, \$), litros de diesel por hora de servicio (*DH*, lt/hr), costo de refacciones (*CR*, \$), seguridad para el operador al maniobrar el tractor (*SO*), facilidad para realizar cambios de implementos en el tractor (*FI*) y el servicio al cliente postventa por parte del proveedor (*SC*), donde se puede observar que los primeros cuatro son cuantitativos y pueden ser expresados en alguna unidad de medición; sin embargo, los tres últimos son cualitativos. Se puede apreciar que el GD dio mucha importancia al criterio costo y que, al final, los atributos seleccionados provienen de una combinación de los criterios evaluados.

Los valores de los atributos objetivos para el caso de estudio se aprecian en el Cuadro 3 y los correspondientes a los subjetivos, que fueron obtenidos mediante juicios de los cinco integrantes del GD, éstos se ilustran en el Cuadro 4.

Cuadro 3.				
Valores de los atributos objetivos				
A^k	Atributos Objetivos			
	CI	CM	DH	CR
A¹	268,000	60,000	9	35,000
A²	375,000	75,000	7	53,500
A³	342,000	12,000	8	92,500
A⁴	285,000	55,000	8.5	75,000
A⁵	325,000	45,000	7	45,000
A⁶	315,000	35,000	8.5	42,500

Fuente: elaboración del autor.

Cuadro 4.															
Valoraciones emitidas por el GD para la determinación de atributos subjetivos															
A^k	E₁			E₂			E₃			E₄			E₅		
	SO	FI	SC												
A¹	8	5	7	4	6	6	5	8	4	7	5	6	7	5	8
A²	8	4	7	4	8	6	5	6	6	8	4	5	5	7	7
A³	5	7	7	7	6	4	7	8	6	7	6	7	7	6	4
A⁴	8	8	4	4	4	5	4	4	7	8	7	5	8	6	5
A⁵	4	7	5	7	8	5	4	4	7	7	7	5	5	5	6
A⁶	6	4	8	6	7	8	8	7	5	7	6	6	6	7	5

Fuente: elaboración del autor.

En el Cuadro 5 se indican los valores subjetivos para el análisis AIVE y A EVE con dos cifras significativas para cada uno de los escenarios de análisis.

Cuadro 5.						
Valores subjetivos para AIVE y A EVE						
A^k	AIVE			A EVE		
	SO	FI	SC	SO	FI	SC
A¹	6.2	5.8	6.2	6.33	5.33	6.33
A²	6	5.8	6.2	6	5.67	6.33
A³	6.6	6.6	5.6	7	6.33	5.67
A⁴	6.4	5.8	5.2	6.67	5.67	5
A⁵	5.4	6.2	5.6	5.33	6.33	5.33
A⁶	6.6	6.2	6.4	6.33	6.67	6.33

Fuente: elaboración del autor.

Con los valores subjetivos obtenidos en el Cuadro 3 y Cuadro 5, se construyeron las dos matrices de decisión final, una para cada uno de los escenarios de evaluación. En el Cuadro 6 y Cuadro 7 se ilustran dichas matrices y en cada una de ellas se indican las alternativas ideal e anti-ideal. De la misma manera, se expone la ponderación usada para cada atributo y la norma de los mismos.

Cuadro 6.							
Matriz de decisión final para escenario AIVE							
A^k	Atributos Objetivos				Atributos Subjetivos AIVE		
	CI	CM	DH	CR	SO	FI	SC
A¹	268,000	60,000	9	35,000	6.2	5.8	6.2
A²	375,000	75,000	7	53,500	6	5.8	6.2
A³	342,000	12,000	8	92,500	6.6	6.6	5.6
A⁴	285,000	55,000	8.5	75,000	6.4	5.8	5.2
A⁵	325,000	45,000	7	45,000	5.4	6.2	5.6
A⁶	315,000	35,000	8.5	42,500	6.6	6.2	6.4
A+	268,000	12,000	7	35,000	6.6	6.6	6.4
A-	375,000	75,000	9	92,500	5.4	5.8	5.2
w	0.1594	0.1155	0.1474	0.1315	0.1594	0.1514	0.1355
Norma	784,530.43	125,075.98	19.685	148,659.85	15.22	14.87	14.4

Fuente: elaboración del autor.

Cuadro 7.							
Matriz de decisión final para escenario A EVE							
A^k	Atributos Objetivos				Atributos Subjetivos A EVE		
	CI	CM	DH	CR	SO	FI	SC
A¹	268,000	60,000	9	35,000	6.33	5.33	6.33
A²	375,000	75,000	7	53,500	6	5.67	6.33
A³	342,000	12,000	8	92,500	7	6.33	5.67
A⁴	285,000	55,000	8.5	75,000	6.67	5.67	5
A⁵	325,000	45,000	7	45,000	5.33	6.33	5.33
A⁶	315,000	35,000	8.5	42,500	6.33	6.67	6.33
A+	268,000	12,000	7	35,000	7	7	6
A-	375,000	75,000	9	92,500	5	5	5
w	0.1688	0.1104	0.1494	0.1299	0.1558	0.1558	0.1299
Norma	784530.43	125075.98	19.69	148659.85	15.43	14.74	14.34

Fuente: elaboración del autor.

Cuadro 8.							
Juicios para la ponderación de atributos							
Atributos							
Expertos	CI	CM	DH	CR	SO	FI	SC
E1	9	7	8	8	9	9	9
E2	9	4	9	6	8	8	5
E3	8	8	7	6	9	8	7
E4	5	6	8	9	7	5	7
E5	9	4	5	4	7	8	6
Promedio AIVE	8	5.8	7.4	6.6	8	7.6	6.8
Ponderación AIVE	0.1594	0.1155	0.1474	0.1315	0.1594	0.1514	0.1355
Promedio AEEV	8.6667	5.6667	7.6667	6.6667	8	8	6.6667
Ponderación AEEV	0.1688	0.1104	0.1494	0.1299	0.1558	0.1558	0.1299

Fuente: elaboración del autor.

Por razones de espacio solo se ilustra el procedimiento completo de la evaluación en el escenario AIVE- w_{AIVE} . En relación con los otros escenarios de evaluación solo se ilustran los resultados obtenidos.

Cada uno de los elementos de la matriz de decisión final se dividió entre la norma, quedando de esta manera con datos adimensionales, y después fue ponderada de acuerdo a los niveles de importancia. La matriz normalizada y ponderada se expone en el Cuadro 9.

Cuadro 9.							
Matriz de decisión final normalizada y ponderada							
A^k	Atributos Objetivos				Atributos Subjetivos AIVE		
	CI	CM	DH	CR	SO	FI	SC
A¹	0.05445	0.05541	0.06739	0.03096	0.06493	0.05902	0.05831
A²	0.07619	0.06926	0.05242	0.04732	0.06283	0.05902	0.05831
A³	0.06949	0.01108	0.0599	0.08182	0.06912	0.06716	0.05266
A⁴	0.05791	0.05079	0.06365	0.06634	0.06702	0.05902	0.0489
A⁵	0.06603	0.04155	0.05242	0.03981	0.05655	0.06309	0.05266
A⁶	0.064	0.03232	0.06365	0.03759	0.06912	0.06309	0.06019
A⁺	0.05445	0.01108	0.05242	0.03096	0.06912	0.06716	0.06019
A⁻	0.07619	0.06926	0.06739	0.08182	0.05655	0.05902	0.0489

Fuente: elaboración del autor.

Con los valores de la matriz de decisión final normalizada y ponderada, se calculó la distancia euclidiana que tiene cada uno de los puntos que representan las alternativas en evaluación, y la alternativa ideal e anti-ideal. Los resulta-

dos obtenidos se ilustran en el Cuadro 10, donde se muestra, además, el índice RC obtenido mediante la ecuación (18) y el orden en que deben ser seleccionadas las alternativas. Por último, en el Cuadro 11, se exponen los índices RC obtenidos en cada uno de los escenarios.

Cuadro 10. insertar				
Distancias a Ideal e Anti-Ideal y RC (Caso AIVE-wAIVE)				
A^k	Distancia a A+	Distancia a A-	RC	Orden
A¹	0.04771	0.0584	0.449627744793139	3
A²	0.06507	0.03927	0.623634272570443	5
A³	0.05409	0.06102	0.46989835809226	4
A⁴	0.05626	0.03223	0.635778054017403	6
A⁵	0.03704	0.05377	0.407884594207686	2
A⁶	0.027	0.06152	0.305015815634885	1

Fuente: elaboración del autor.

Cuadro 11.								
Índices RC y orden para los escenarios								
A^k	AIVE - W AIVE		AIVE - W AEVE		AEVE - W AIVE		AEVE - W AEVE	
	Índice	Orden	Índice	Orden	Índice	Orden	Índice	Orden
A¹	0.4496481	3	0.4417705	3	0.4536141	3	0.4468497	3
A²	0.6236235	5	0.6192073	5	0.619795	5	0.6157774	5
A³	0.4698841	4	0.4783391	4	0.4630505	4	0.4712393	4
A⁴	0.6357599	6	0.6293221	6	0.6287453	6	0.6227019	6
A⁵	0.4079014	2	0.4048208	2	0.4182632	2	0.4148258	2
A⁶	0.3050111	1	0.3060535	1	0.3052617	1	0.305547	1

Fuente: elaboración del autor.

Conclusiones

La selección de tecnología avanzada de manufactura es un área ampliamente estudiada, y muestra de ello es la amplia variedad de artículos científicos que se encuentran en la literatura. Sin embargo, este mismo problema parece estar desatendido por el sector académico y científico. Por ello, en este artículo, se ha expuesto un modelo para evaluación de tractores agrícolas y con base en los resultados aquí presentados del estudio de caso que se reporta, se puede concluir que el modelo es incluyente, dado que integra ambos tipos de atributos en el análisis, cualitativos y cuantitativos. Además, la decisión fue tomada por un conjunto de personas, por lo cual tiene un aspecto integrador.

El modelo propuesto inicialmente ha evolucionado mucho, debido principalmente a que debe ser fácil de aplicar y entender por los agricultores, sin ayuda de especialistas. En estos momentos se usa la TGN para determinar la importancia de los atributos, en lugar del análisis factorial, el cual es más complejo. Así, la metodología de aplicación del modelo se simplifica.

En la actualidad, el modelo y su metodología de aplicación han sido usados para la elección de otro tipo de tecnologías; sin embargo, el proceso de caracterización de los atributos de cada una de éstas es algo que se dificulta todavía a los agricultores, por lo tanto es la única fase en que se requiere de la intervención de un especialista.

Se recomienda en futuras investigaciones integrar un criterio más de evaluación, en el que se incluyan aspectos ambientales y de desarrollo sustentable, que ha sido ignorado en esta investigación.

Referencias

- Alagarswamy, G. (2010). Indian agriculture: Challenges of globalization. *Agricultural Systems*, 103(5), 342-343.
- Amiri, M. P. (2010). Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. *Expert Systems with Applications*, 37(9), 6218-6224.
- Boubekri, N., Sahoui, M. & Lakrib, C. (1991). Development of an expert system for industrial robot selection. *Computers and Industrial Engineering*, 21, 119-127.
- Braglia, M. & Gabbrielli, R. (2000). Dimensional analysis for investment selection in industrial robots. *International Journal of Production Research*, 38(18), 4843-3448.
- Buckingham, E. (1941). On physically similar systems: Illustration of the use of dimensional equations. *The Physician Review*, 4, 345-376.
- Camarena, E. A., Gracia C. & Cabrera, J. M. (2004). A mixed integer linear programming machinery selection model for multifarm systems. *Biosystems Engineering*, 87(2), 145-154.
- Carletto, C., Kirk, A., Winters, P. C. & Davis, B. (2010). Globalization and smallholders: The adoption, diffusion, and welfare impact of non-traditional export crops in Guatemala. *World Development*, 38(6), 814-827.
- Chan, F., Chan, M., Lau C. & Ip, R. (2001). Investment appraisal techniques for advanced manufacturing technology (AMT): A literature review. *Integrated Manufacturing Systems*, 2(1), 35-47.
- Chang, T. H. & Wang, T. C. (2009). Measuring the success possibility of implementing advanced manufacturing technology by utilizing the consistent fuzzy preference relations. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 4313-4320.
- Chuu, S. J. (2009). Selecting the advanced manufacturing technology using fuzzy multiple attributes group decision making with multiple fuzzy information. *Computers and Industrial Engineering*, 57(3), 1033-1042.
- Currit, N. & Zasterling, W. E. (2009). Globalization and population drivers of rural-urban land-use change in Chihuahua, Mexico. *Land Use Policy*, 26(3), 535-544.
- Elhorst, P. (1993). The estimation of investment equations at the farm level. *European Review of Agricultural Economics*, 20(2), 167-182.
- García, J. L., Noriega, S., Díaz, J. J. & Sánchez, J. (2005a). Evaluación y justificación de robots: una metodología multicriterio. *Revista Aportes*, 10(30), 123-134.
- García, J. L., Noriega, S., Díaz, J. J., Rodríguez, M. & Piña, M. (2005b). Modelo multicriterio para la justificación de inversiones en robots. *Revista CUIC y T*, 2(7), 25-34.
- Goh, C., Chin, Y., Tung, A. & Chen, C. (1996). A revised weighted sum decision model for robot selection. *Computers Industrial Engineering*, 30(2), 193-199.
- Gutjahr, W. J., Katzensteiner, S., Reiter, P., Stummer, C. & Denk, M. (2010). Multi-objective decision analysis for competence-oriented project portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, 205(3), 670-679.
- Hofmann, C. & Orr, S. (2005). Advanced manufacturing technology adoption-the German experience. *Technovation*, 25(7), 711-724.
- Imany, M. & Schlesinger, R. (1989). Decision models for robot selection: A comparison of ordinary least squares and linear goal programming methods. *Decision Sciences*, 20, 40-53.
- Knott, K. and Gretto, R. (1982). A model for evaluating alternative robot systems under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 20, 155-165.

- Lal, H. J., Jones, W., Pearl, R. W. & Shoup, W. D. (1997). FARMSYS - A whole-farm machinery management decision support system. *Agricultural Systems*, 38(3), 257-273.
- Lazzari, M. & Mazzetto, F. (1996). A PC model for selecting multicropping farm machinery system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 14(1), 43-59.
- Low, L. K. & Seetharaman, A. (2004). The selection and management of cost justification techniques among advanced manufacturing technology companies in Malaysia. *International Journal of Management*, 21(1), 45-50.
- Offodile, O., Lambert, B. & Dudek, R. (1987). Development of a computer aided robot selection procedure (CARSF). *International Journal of Production Research*, 25, 1109-1121.
- Parkan, C. & Wu, L. (1998). Decision-making and performance measurement models with applications to robot selection. *Computers & Industrial Engineering*, 36(3), 503-523.
- Russel, N. P., Milligan, R. A. & Ladue, E. L. (1983). A stochastic simulation model for evaluating forage machinery performance. *Agricultural Systems*, 10(1), 39-63.
- Shepetukha, Y. & Olson, D. L. (2001). Comparative analysis of multiattribute techniques based on cardinal and ordinal inputs. *Mathematical and Computer Modelling*, 34(1), 229-241.
- Sogaard, H. T. & Sorensen, C. G. (2004). A model for optimal selection of machinery sizes within the farm machinery system. *Biosystems Engineering*, 89(1), 13-28.
- Thakur, L. & Jain, V. (2008). Advanced manufacturing techniques and information technology adoption in India: A current perspective and some comparisons. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(5/6), 618-631.
- Theodorou, P. & Florou, G. (2008). Manufacturing strategies and financial performance-The effect of advanced information technology: CAD/CAM systems. *Omega*, 36(1), 107-121.
- Wei, C., Kamrani, A. & Weibe, H. (1992). Animated simulation of the robot process capability. *Computers and Industrial Engineering*, 23, 237-240.
- Yoon, K. (1980). *Systems Selection by Multiple Attribute Decision Making*. PhD dissertation, Kansas State University, Manhattan, USA.