

MODEL EVALUATION OF QUALITY ATTRIBUTES FOR HOPS (*Humulus lupulus* L.)

EVALUACIÓN DE MODELOS DE LOS ATRIBUTOS DE CALIDAD PARA LOS LÚPULOS (*Humulus lupulus* L.)

Martin Pavlovic^{1,2}, Viljem Pavlovic³

¹International Hop Growers' Convention IHGC-Secretary General, 22, rue des Roses, F-67173 Brumath, France (martin.pavlovic@guest.arnes.si). ²Slovenian Institute of Hop Research and Brewing, Zalskega tabora 2, 3310 Zalec, Slovenia. ³University of Maribor, Faculty of Agriculture and Life Sciences, Pivola 10, 2311 Hoce, Slovenia.

ABSTRACT

Hops (*Humulus lupulus* L.) are vital for the brewing industry, as they contribute significantly to the organoleptic qualities of beer, including taste and flavor. Experimental hop breeding data from the Slovenian Institute of Hop Research and Brewing (IHPS) were used to create a model based on the multi-attribute decision modeling methodology. The model has 18 attributes hierarchically grouped within four main attributes: *Biology*, *Chemistry*, *Morphology* and *Brewing value*. Furthermore, utility functions in the model were defined by sets of elementary decision rules throughout the entire hierarchy for all aggregated attributes. The central part of the model contains 144 decision rules, which were specified according to the model users' previous breeding experiences. Four prospective hop hybrids and a reference hop variety with the target characteristics of plant resistance and brewing value were evaluated. Based on the breeding experiences and model results attributes' assessments were carried out. Decisions based on the model evaluation offered an additional tool for experts' final decisions in selecting appropriate materials for further breeding or the commercial use of hop plants.

Key words: hop industry, breeding, decision-making, model, IHPS

INTRODUCTION

Brewing industry requires raw materials of a high quality and hops (*Humulus lupulus* L.) are vital, as they contribute significantly to the organoleptic qualities of beer, including taste

RESUMEN

Los lúpulos (*Humulus lupulus* L.) son fundamentales para la industria cervecera, ya que contribuyen significativamente a las cualidades organolépticas de la cerveza, como el gusto y el sabor. Los datos de mejoramiento experimental de lúpulos del Instituto Esloveno de Investigación de Lúpulos y Elaboración de Cerveza (IHPS) se usaron para crear un modelo basado en la metodología de modelado de decisiones de atributos múltiples. El modelo cuenta con 18 atributos agrupados jerárquicamente dentro de cuatro atributos principales: *Biología*, *Química*, *Morfología* y *el Valor de elaboración de la cerveza*. Además, las funciones de utilidad en el modelo se definieron por conjuntos de reglas de decisión primaria en la jerarquía completa de todos los atributos agregados. La parte central del modelo contiene 144 reglas de decisión, especificadas de acuerdo a las experiencias previas de mejoramiento de los usuarios del modelo. Se evaluaron cuatro posibles híbridos de lúpulo y una variedad de lúpulo de referencia con las características previstas de resistencia de las plantas y el valor de elaboración. Basándose en las experiencias de mejoramiento y los resultados del modelo, se realizaron las evaluaciones de los atributos. Las decisiones basadas en la evaluación del modelo proporcionaron una herramienta adicional para las decisiones finales de los expertos en la selección de materiales apropiados para mejoramiento futuro o el uso comercial de plantas de lúpulo.

Palabras clave: industria del lúpulo, mejoramiento, toma de decisiones, modelo, IHPS

INTRODUCCIÓN

La industria cervecera requiere de materias primas de alta calidad y los lúpulos (*Humulus lupulus* L.) son fundamentales ya que contribuyen

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: July, 2010. Approved: March, 2011.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 45: 339-351. 2011.

and flavor. To remain competitive in the global hop industry, hop breeders must respond to the ever-changing needs of the brewing community by providing appropriate new varieties. The aim of hop breeding is to satisfy the needs throughout the whole chain of the hop industry. The target characteristics of new varieties include suitable brewing value (amount of alpha-acids, good flavor), high-quality crops and resistance to pests, as well as resistance to diseases. The main hop consumer is the brewing industry, which needs stable amounts of high-quality hops of desired varieties and origin, with constant quality (Pavlovic *et al.*, 2008).

During the last few decades there has been sustained interest in the ability to identify or assess hop varieties or potential breeding materials with chemical analysis of the essential oils and resin components, the composition of which is genetically controlled (Lemmens, 1998). However, expert decisions for further selection of hybrids require the synthesis of information from different kinds of data-subjective (assessments in the field) and objective (chemical analysis). To improve hop breeding results, various decision support methods are available for application. Javornik *et al.* (2005) report about molecular approaches, which can support breeders' decisions in early crossing combinations. Henning and Townsend (2005) use a similar approach, while De Keukleire (1999) suggest classical chemical analysis to choose the best new variety. Furthermore, the use of methods within the expert system in hop breeding has been discussed (Pavlovic *et al.*, 2007). Recently, multi-criteria decision analysis (MCDA) has been recognized in hop hybrids assessment as a promising method. The MCDA approach is able to synthesize information about many different and often conflicting attributes into one unified assessment (Rozman *et al.*, 2006) that can be numerical or discrete (Pazek *et al.*, 2006). To date, MCDA has been widely used in agriculture, as described by Znidarsic *et al.* (2006), Scatasta *et al.* (2007) and Pazek and Rozman (2007).

The DEX method (Bohanec, 2008), which is employed in this study, uses qualitative variables and utility functions in the form of decision rules, and provides qualitative assessments of alternatives. Recently, DEX has been used in agronomy to assess the impact of cropping systems on soil quality (Bohanec *et al.*, 2007) and the economic and

significativamente a las cualidades organolépticas de la cerveza, como el gusto y el sabor. Para seguir siendo competitivos en la industria mundial del lúpulo, los mejoradores de lúpulos deben responder a las necesidades siempre cambiantes de la comunidad que produce cerveza proporcionando nuevas y apropiadas variedades. El objetivo del mejoramiento de lúpulos es satisfacer las necesidades de toda la cadena de la industria del lúpulo. Entre las características previstas en las nuevas variedades están el valor de preparación adecuada (cantidad de alfa-ácidos, buen sabor), los cultivos de alta calidad, y la resistencia a plagas y enfermedades. El principal consumidor de lúpulos es la industria cervecera, que necesita cantidades estables de lúpulos de calidad, con variedades y origen deseables, y de una calidad constante (Pavlovic *et al.*, 2008).

Durante las últimas décadas ha habido un interés sostenido en la capacidad de identificar o evaluar las variedades de lúpulo o materiales de mejoramiento potenciales con el análisis químico de los aceites esenciales y los componentes de la resina, cuya composición está genéticamente controlada (Lemmens, 1998). Sin embargo, las decisiones de los expertos para la selección de híbridos requieren de síntesis de información de diferentes tipos de datos subjetivos (evaluaciones de campo) y objetivos (análisis químico). Para mejorar los resultados de mejoramiento de lúpulos, hay varios métodos de apoyo a las decisiones que se pueden aplicar. Javornik *et al.* (2005) informan acerca de los enfoques moleculares, que pueden apoyar las decisiones de los mejoradores al inicio de las combinaciones de cruces. Henning y Townsend (2005) usan un enfoque similar, mientras que De Keukleire (1999) propone el análisis químico clásico para elegir la mejor variedad nueva. Además, se ha analizado el uso de métodos en el sistema experto en el mejoramiento de lúpulos (Pavlovic *et al.*, 2007). Recientemente, el análisis de múltiples criterios de decisión (MCDA) se ha reconocido como un método promisorio en la evaluación de híbridos de lúpulos. El enfoque del MCDA puede sintetizar información acerca de muchos atributos diferentes y a menudo en conflicto en una evaluación unificada (Rozman *et al.*, 2006), que puede ser numérica o discreta (Pazek *et al.*, 2006). Hasta la fecha, el MCDA se ha usado en la agricultura, según lo descrito por Znidarsic *et al.* (2006), Scatasta *et al.* (2007) y Pazek y Rozman, (2007).

ecological impact of using genetically modified crops (Bohanec *et al.*, 2008).

This research belongs to an international project called Automation Agents in Decision Support Systems (Pavlovic *et al.*, 2008). In this paper, a multi-attribute decision model based on DEX methodology for hop hybrids assessment applied to four promising hop hybrids (appropriate hybrids for further breeding) is presented also in a hop industry case study.

MATERIAL AND METHODS

Plant material

Within the hop breeding research program carried out at the Slovenian Institute of Hop Research and Brewing (IHPS), various hop hybrids appeared to have good prospects for further breeding according to the research objectives in terms of brewing and agricultural value (Cerenak, 2006).

In this research, the data from the four most promising Slovenian hop hybrids, A1/54, A2/104, A3/112, and A4/122, were compared with the reference variety, which had the desired characteristics for plant resistance and brewing value. The assessment was carried out with a qualitative multi-attribute model based on the DEX methodology.

DEX methodology

The assessment was carried out with a qualitative multi-attribute model based on the DEX methodology (Bohanec *et al.*, 2000). We first developed the model and then applied it to assess the aforementioned hop hybrids. DEX combines traditional multi-attribute decision-making with some elements of Expert Systems and Machine Learning. The distinguishing characteristic of DEX is its capability to deal with qualitative variables. Instead of numerical variables, which typically constitute traditional quantitative MCDA models, DEX uses qualitative variables whose values are usually represented by words rather than numbers, such as UNACCEPTABLE, APPROPRIATE, HIGH, PROSPECTIVE, etc. Furthermore, DEX uses “if-then” decision rules to evaluate decision alternatives. The method is supported by the software program DEXi (Bohanec, 2008), which has been applied to various real-life decision problems (Znidarsic and Bohanec, 2007). DEX models are developed through the following three steps:

- 1) The problem is decomposed into less complex individual problems; the problems are hierarchically structured into a

El método de ejecución directa (DEX) (Bohanec, 2008), usado en este estudio, utiliza las variables cualitativas y las funciones de utilidad en la forma de reglas de decisión, y proporciona evaluaciones cualitativas de las alternativas. Recientemente, se ha usado DEX en agronomía para evaluar el impacto de los sistemas de cultivo en la calidad del suelo (Bohanec *et al.*, 2007) y el impacto económico y ecológico de la utilización de cultivos modificados genéticamente (Bohanec *et al.*, 2008).

Esta investigación forma parte de un proyecto internacional llamado Automation Agents in Decision Support Systems (Agentes de Automatización para Sistemas de Apoyo a la Toma de Decisiones) (Pavlovic *et al.*, 2008). En este estudio, un modelo de decisiones de atributos múltiples, basado en DEX para la evaluación de híbridos de lúpulos, aplicado a cuatro prometedores híbridos de lúpulos (híbridos adecuados para un mejoramiento futuro), se presenta también como un estudio de caso de la industria del lúpulo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Dentro del programa de investigación del mejoramiento de lúpulos realizado en el Instituto Esloveno de Investigación de Lúpulos y Elaboración de Cerveza (IHPS), varios híbridos de lúpulos parecieron tener buenas perspectivas de acuerdo con los objetivos de investigación en elaboración de cerveza y el valor agrícola (Cerenak, 2006).

En esta investigación, los datos de los cuatro híbridos de lúpulos más prometedores de Eslovenia, A1/54, A2/104, A3/112 y A4/122, se compararon con la variedad de referencia, que tenía las características deseadas de resistencia de la planta y el valor de elaboración de la cerveza. La evaluación se realizó con un modelo cualitativo de atributos múltiples basado en DEX.

Metodología DEX

La evaluación se realizó con un modelo cualitativo de atributos múltiples basado en la metodología DEX (Bohanec *et al.*, 2000). Primero se desarrolló el modelo y luego se aplicó para evaluar los híbridos de lúpulos mencionados. DEX combina la toma de decisiones tradicional de atributos múltiples con algunos elementos del software Expert Systems and Machine Learning. La característica distintiva de DEX es su capacidad para tratar a las variables cualitativas. En lugar de variables numéricas, que

tree of attributes that represents the “skeleton” of the model. Terminal nodes of the tree, i.e., leaves or *basic attributes*, represent inputs to the model, and the root node represents the main output: an overall assessment of the evaluated alternatives (hop hybrids in our case). The internal nodes of the model are called *aggregate attributes*.

- 2) Each sub-problem is represented by a qualitative attribute with a defined value domain with a set of values. The value domain is discrete and typically consists of words. Usually, the domain is also ordered preferentially, so that consecutive words denote more and more desirable characteristics of the corresponding attributes.
- 3) To define the aggregation of values from the input to output attributes of the model, utility functions are defined for each aggregate attribute in the model. In the DEX method the utility functions are represented by decision rules, which are typically formulated by decision makers or domain experts.

Model for hop hybrids evaluation

The model for hop hybrids' evaluation takes into account four main factors: the *Biology*, *Chemistry*, *Morphology* and *Brewing value* of the hop hybrids. This is reflected in the hierarchical structure of the model, which consists of four corresponding sub-trees of attributes (Figure 1). Based on the breeding team's experience, sets of discrete values were defined for all 18 attributes in the model (Table 1).

Biology

The aggregate attribute *Biology* includes two basic attributes: (i) *plant resistance*, and (ii) *plant outlook*. *Plant resistance* is related to two main hop diseases, downy mildew on hops (*Pseudoperonospora humuli*) and powdery mildew on hops (*Sphaerotheca humuli*), and it was evaluated in a field collection of hop breeding material. Each plant was assessed based on the occurrence of infected tissue of the two main hop diseases from 0 to 2, where 0 indicates a resistant plant, 1 a moderately susceptible plant and 2 a susceptible plant (Seigner *et al.*, 2005, Radisek *et al.*, 2007). Since the reference variety was of low resistance against plant diseases, the mark BAD RESISTANT was given to samples with the same level of susceptibility within a tolerance of 15 %. Hybrids with a lower level of damaged plants were labeled RESISTANT, while those with a higher level of damaged plants were SUSCEPTIBLE.

The attribute *plant outlook* includes properties such as plant vigor, i.e., branching out, the technological ripeness, the length and the tightness of the hop cones. These properties were measured regularly according to a research plan methodology

normalmente constituyen modelos cuantitativos tradicionales de MCDA, DEX usa variables cualitativas cuyos valores suelen estar representados por palabras en lugar de números, tales como INACEPTABLE, ADECUADO, ALTO, CON FUTURO, etc. Además DEX usa reglas de decisiones “si-entonces” para evaluar alternativas de decisión. El método es compatible con el software DEXi (Bohanec, 2008), que se ha aplicado a varios problemas de decisión en la vida real (Znidarsic y Bohanec, 2007). Los modelos DEX se construyen con los tres pasos siguientes:

- 1) El problema se descompone en problemas individuales de menor complejidad; los problemas se estructuran jerárquicamente en un árbol de atributos que representa el “esqueleto” del modelo. Los nodos terminales del árbol, es decir, las hojas o los *atributos básicos*, representan insumos para el modelo, y el nodo raíz representa el producto principal, que es una evaluación general de las alternativas evaluadas (híbridos de lúpulos en este caso). Los nodos internos del modelo se denominan *atributos de agregados*.
- 2) Cada sub-problema se representa por un atributo cualitativo con un ámbito de valores definidos a través de un conjunto de valores. El campo de valores es discreto y por lo general se compone de palabras. Generalmente, el campo está ordenado de manera preferencial, por lo que las palabras consecutivas señalan características cada vez más deseables de los atributos correspondientes.
- 3) Para definir la suma de los valores desde los atributos de entrada a los de salida del modelo, se determinan las funciones de utilidad para cada atributo agregado en el modelo. En el método DEX las funciones de utilidad están representadas por las reglas de decisión, que suelen ser formuladas por los tomadores de decisiones o expertos en el campo.

Modelo para la evaluación de híbridos de lúpulos

El modelo para la evaluación de híbridos de lúpulos considera cuatro factores principales: *Biología*, *Química*, *Morfología* y *el Valor de elaboración de la cerveza* de los híbridos de lúpulos. Esto se refleja en la estructura jerárquica del modelo, que consta de cuatro subestructuras de atributos (Figura 1). Con base en la experiencia del equipo de mejoramiento, se definieron conjuntos de valores discretos para los 18 atributos del modelo (Cuadro 1).

Biología

El factor *Biología* incluye dos atributos básicos: (i) la *resistencia de la planta*, y (ii) la *perspectivas de la planta*. La *resistencia de la planta* está relacionada con dos enfermedades principales del lúpulo: el mildiú del lúpulo (*Pseudoperonospora humuli*) y el oídio

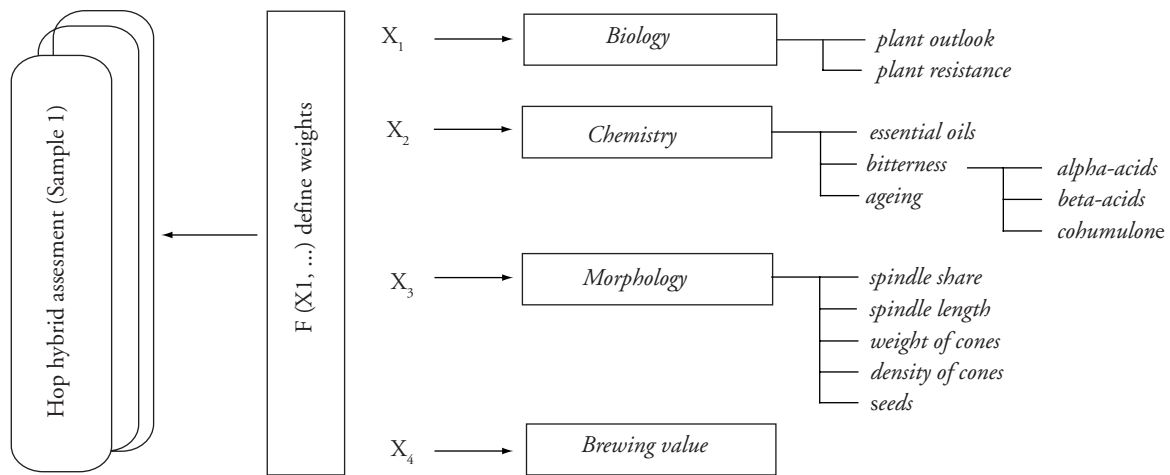


Figure 1. Hierarchy tree of the multi-attribute decision model

Figura 1. Estructura de árbol del modelo de decisión de atributos múltiples

Table 1. Sets of discrete values for model attributes.

Cuadro 1. Conjuntos de valores discretos de los atributos del modelo.

Model attribute	Domain
X_hop hybrid assessment	{NON PROSPECTIVE, WORSE, REFERENCE, PROSPECTIVE}
X_Biology	{BAD, SUITABLE, GOOD, EXCELLENT}
X_plant resistance	{SUSCEPTIBLE, BAD RESISTANT, RESISTANT}
X_plant outlook	{BAD, SUITABLE, GOOD}
X_Chemistry	{WORSE, GOOD, REFERENCE, BETTER}
X_essential oils	{LESS, REFERENCE, MORE}
X_ageing	{BAD, GOOD, EXCELLENT}
X_bitterness	{WORSE, REFERENCE, BETTER}
X_alpha-acids	{LESS, REFERENCE, MORE, EXCELLENT}
X_beta-acids	{LESS, REFERENCE, MORE}
X_cohumulone	{MORE, REFERENCE, LESS}
X_Morphology	{BAD, ACCEPTABLE, GOOD}
X_spindle share	{BAD, ACCEPTABLE, GOOD}
X_spindle length	{BAD, ACCEPTABLE, GOOD}
X_weight of cones	{BAD, ACCEPTABLE, GOOD}
X_density of cones	{BAD, ACCEPTABLE, GOOD}
X_seeds	{BAD, ACCEPTABLE, GOOD}
X_Brewing value	{BAD, GOOD, EXCELLENT}

(Cerenak, 2006). The model enables three attribute values: BAD, SUITABLE and GOOD.

Chemistry

The aggregate attribute *Chemistry* consists of three attributes: (i) *essential oils*, (ii) *ageing* and (iii) *bitterness*. *Bitterness* is assessed through the relative content of *alpha-acids*, *beta-acids* in dry

del lúpulo (*Sphaerotheca humuli*), y se evaluó en una recolección de campo de material de mejoramiento de lúpulo. Cada planta se evaluó con base en la aparición de tejido infectado de las dos enfermedades principales de lúpulo, de 0 a 2, donde 0 corresponde a una planta resistente, 1 a una planta moderadamente susceptible y 2 a una planta susceptible (Seigner *et al.*, 2005, Radisek *et al.*, 2007). Debido a que la variedad de referencia era de baja resistencia contra enfermedades de las plantas, la marca

matter and the percentage of *cobumulone* in alpha-acids. For each attribute a set of numeric values was defined again based on chemical analysis, in which the following methods were used: humidity content, LCV (lead conductance value in hops), percentage of xanthohumol (Analytica EBC, 1998) and the HSI (ASBC, 1992). The attribute *ageing*, which determines the loss of alpha acid content defined by the HSI, depends on temperature. Thus, measurements were taken when the hops were stored at 4 °C and 20 °C. Individual hybrid assessment results were compared with the results of the reference hop variety. According to the DEX methodology, quantitative measures were converted into qualitative values. Hybrids were assessed as; WORSE if the attribute values were lower than 80 % of those from the reference variety; GOOD if they ranged between 80 % and 95 %; REFERENCE if they ranged between 95 % and 105 %; BETTER if they were higher than 105 %.

Morphology

Attributes within the aggregate attribute *Morphology*: (i) *spindle share*, (ii) *spindle length*, (iii) *weight of cones*, (iv) *density of cones* and (v) *seeds*, illustrate the characteristics of hop cones (female blossoms) that represent the main plant product. These characteristics affect the hop production technology procedures and consequently hop yield quality and amount. Within the evaluation of these morphological characteristics, hop hybrids were evaluated after a harvest according to the approved research plan with the use of the domain system from 0 to 5 (Cerenak, 2006). In the model, marks 5 and 4 took a discrete value GOOD, mark 3 from the assessment was defined as ACCEPTABLE, while marks 2, 1 and 0 received the value BAD.

Brewing value

This attribute was determined with chemical analysis of wort and beer brewed with the selected hop hybrids and a reference variety. The results of the chemical analysis were the starting point for the assessment. After the hopping, all types of wort were analyzed with standard analysis protocols. In wort, the contents of the extract (%), alcohol (% v/v), P.I. value, color EBC, bitterness, alpha-acids (%), iso-alpha-acids (mg L⁻¹), polyphenols (mg L⁻¹) and anthocyanogens (mg L⁻¹) were measured (Analytica EBC, 1998; MEBAK, 2002).

In a small experimental microbrewery, samples of the hop hybrids were used for brewing. The *Brewing value* of the beer samples brewed from those hop hybrids was based on a panel sensory assessment by 22 beer experts. Standard parameters such as the beer's taste, hop aroma quality, hop aroma intensity, bitterness quality and bitterness intensity of the beer samples

POCO RESISTENTE fue dada a muestras con el mismo nivel de susceptibilidad, dentro de una tolerancia de 15 %. Los híbridos con un menor nivel de plantas dañadas fueron etiquetados como RESISTENTES, mientras que aquellos con un mayor nivel de plantas dañadas fueron considerados SUSCEPTIBLES.

El atributo *perspectiva de la planta* incluye características como el vigor de la planta, es decir, ramificación, madurez tecnológica, longitud y estrechez de los conos de los lúpulos. Estas propiedades se midieron periódicamente de acuerdo a la metodología de un plan de investigación (Cerenak, 2006). El modelo permite que haya tres valores de los atributos: MALO, APTO y BUENO.

Química

El factor agregado *Química* consta de tres atributos: (i) *los aceites esenciales*, (ii) *envejecimiento* y (iii) *amargor*. El amargor se evalúa a través del contenido relativo de los *alfa-ácidos*, *beta-ácidos* en materia seca y el porcentaje de *cobumulona* en alfa-ácidos. Para cada atributo se definió un conjunto de valores numéricos, de nuevo sobre la base de análisis químicos, en los que se usaron los siguientes métodos: contenido de humedad, LCV (valor de la conductancia de liderazgo en el lúpulo), el porcentaje de xanthohumol (Analytica EBC, 1998) y el HSI (ASBC, 1992). El atributo *envejecimiento*, que determina la pérdida del contenido del ácido alfa definido por el HSI, depende de la temperatura. Por tanto, se tomaron las mediciones cuando los lúpulos estaban almacenados a 4 °C y 20 °C. Los resultados de las evaluaciones de los híbridos individuales se compararon con los de la variedad del lúpulo de referencia. De acuerdo con la metodología de ejecución directa, las mediciones cuantitativas fueron convertidas a valores cualitativos. Los híbridos fueron evaluados como PEOR si los valores de los atributos fueron inferiores al 80 % de los de la variedad de referencia; BUENO si oscilaron entre 80 % y 95 %; REFERENCIA si oscilaron entre 95 % y 105 %, MEJOR si fueron superiores a 105 %.

Morfología

Los atributos en el atributo agregado *Morfología* son: (i) *la parte del eje*, (ii) *longitud del eje*, (iii) *peso de los conos*, (iv) *densidad de los conos* y (v) *semillas*, que ilustran las características de los conos de lúpulo (flores femeninas), que representan el producto principal de las plantas. Estas características afectan los procedimientos de tecnología de producción del lúpulo y en consecuencia la calidad y la cantidad del rendimiento de los lúpulos. Dentro de la evaluación de estas características morfológicas, se evaluaron los híbridos de lúpulos después de una cosecha, de acuerdo con el plan de investigación aprobado, usando el sistema de dominio

brewed with the selected hop hybrids and the reference variety were examined according to DLG tests (MEBAK, 2002). The experimental beer tasting took place at the Research Institute of Brewing and Malting PLC, Prague, Czech Republic. The average mark from the sensory assessment panel was included in the model. The quality domain embraced three levels: BAD, GOOD and EXCELLENT. High priority was given to this attribute since it was determined to be an eliminating one. Namely, if the sensory assessments did not meet the brewing experts' minimal expectations, the hybrid was considered inappropriate for further hop breeding.

Utility functions

Utility functions are components of multi-attribute models that define the aggregation aspect of option evaluation. For each aggregate attribute y , whose descendants in the tree of attributes are $x_1, x_2, \dots, x_n$, the corresponding utility function f defines the mapping:

$$f: X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow Y$$

where $X_1, \dots, X_n$ and Y denote value domains of the attributes $x_1, \dots, x_n$ and y .

In DEX (Bohanec, 2008), the value domains are discrete; therefore, the function f maps all the combinations of values $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ into the values of Y . The mapping is represented in a table, where each row gives the value of y for one combination of values $x \in X$. Rows are also called *decision rules*, because each row can be interpreted as an "if-then" rule of the form:

$$\text{if } x_1=v_1 \text{ and } x_2=v_2 \text{ and } \dots \text{ and } x_n=v_n \text{ then } y=v$$

where $v_1 \in X_1, \dots, v_n \in X_n$ and $v \in Y$.

The rules define the mapping of four attributes *Biology*, *Chemistry*, *Morphology* and *Brewing value* into the overall *Hop hybrid assessment* for one combination of values of the four attributes. Each decision rule defines the value of the *Hop hybrid assessment* for one combination of values of the former four attributes. Since *Biology* and *Chemistry* can take four different values, and *Morphology* and *Brewing value* can take three values (Table 1), there are $4 \times 4 \times 3 \times 3 = 144$ possible combinations; hence, there are 144 decision rules.

Table 2 shows the weights that were defined by the breeding and brewing experts for each corresponding attribute. The two main aggregate attributes, *Chemistry* and *Brewing value*, have the most important role in the hybrids assessment. *Chemistry*

de 0 a 5 (Cerenak, 2006). En el modelo, las calificaciones 5 y 4 tuvieron un valor discreto de BUENO; la 3 de la evaluación fue considerada ACCEPTABLE, mientras que las calificaciones 2, 1 y 0 fueron etiquetadas MALO.

Valor de la elaboración de la cerveza

Este atributo se determinó con el análisis químico del mosto y la cerveza elaborada con los híbridos de lúpulos seleccionados y una variedad de referencia. Los resultados de los análisis químicos fueron el punto de partida para la evaluación. Luego se analizaron todos los tipos de mosto con protocolos de análisis estándar. En el mosto, se midieron los contenidos del extracto (%), el alcohol (% v/v), el valor P.I., el color EBC, el amargor, los alfa-ácidos (%), los iso-alfa-ácidos (mg L^{-1}), los polifenoles (mg L^{-1}) y los anthocyanogens (mg L^{-1}) (Analytica EBC, 1998; MEBAK, 2002).

En una cervecería experimental pequeña, las muestras de los híbridos de lúpulo se utilizaron para elaborar cerveza. El *Valor de elaboración* de las muestras de cerveza elaboradas con los híbridos de lúpulos se basó en una evaluación sensorial de un panel con 22 expertos en cerveza. Los parámetros estándar, como el sabor de la cerveza, la calidad del aroma del lúpulo, la intensidad del aroma del lúpulo, la calidad del amargor y la intensidad del mismo en las muestras de cerveza elaborada con híbridos de lúpulo seleccionados y la variedad de referencia se analizaron de acuerdo a las pruebas de DLG (MEBAK, 2002). La degustación de cerveza experimental se realizó en el Instituto de Investigación de Cervecería y Maltería PLC, en Praga, República Checa. La calificación promedio del panel de evaluación sensorial se incluyó en el modelo. El dominio de la calidad abarcó tres niveles: MALO, BUENO y EXCELENTE. Se dio alta prioridad a este atributo porque se determinó que sería decisivo para la eliminación. Es decir, si las evaluaciones sensoriales no cumplían con las expectativas mínimas de los expertos, el híbrido sería considerado inadecuado para el mejoramiento de lúpulos.

Funciones de utilidad

Las funciones de utilidad son los componentes de los modelos de atributos múltiples que definen el aspecto de agregación en la evaluación de opciones. Para cada atributo agregado y , cuyos descendientes en el árbol de atributos son $x_1, x_2, \dots, x_n$, la correspondiente función de utilidad f define la asignación:

$$f: X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow Y$$

donde $X_1, \dots, X_n \in Y$ señalan dominios de valores de los atributos $x_1, \dots, x_n \in y$.

Table 2. Relative ratio of demanded weights for model attributes.**Cuadro 2. Proporción relativa de las ponderaciones exigidas para los atributos del modelo.**

Main attributes	Weight (%)	1 st -level attributes	Weight (%)	2 nd -level attributes	Weight (%)
<i>Biology</i>	15	<i>plant resistance</i>	85		
		<i>plant outlook</i>	15		
<i>Chemistry</i>	35	<i>essential oils</i>	20		
		<i>ageing</i>	40		
		<i>bitterness</i>	40	<i>alpha-acids</i>	40
				<i>beta-acids</i>	30
				<i>cobumulone</i>	30
<i>Morphology</i>	10				
<i>Brewing value</i>	40				

determines the type of hop variety (aroma, alpha or super-alpha type), while *Brewing value* includes an elimination characteristic; consequently, they were assigned relatively high weights, 35 % and 40 %.

Let us illustrate this method using the utility function that maps *plant resistance* (x_1) and *plant outlook* (x_2) to *Biology* (y). In this case, the whole table (Figure 2, bottom right) contains nine rules. Only three of these (rules 1, 8 and 9) were explicitly defined by the expert (this is indicated by the bold values in the *Biology* column). These three rules constitute the initial set S . In addition to these three rules, the user also indicated (Figure 2, bottom left) that the weights of the attributes *plant resistance* and *plant outlook* should be $w_1 = 86$ % and $w_2 = 14$ %.

The decision rules for the final hop hybrid assessment were defined according to the model users' previous breeding experiences. The rules were determined taking into account the minimum and maximum values of the four constituting attributes. For instance, the hop hybrid with the lowest defined values in all attributes was assigned the worst assessment result. On the other hand, the hop hybrid with the highest relative assessment result signified the hybrid with the highest optimal set of values, i.e., the best prospective hybrid for further breeding.

RESULTS AND DISCUSSION

Evaluation of the hybrids

Among all the hop plants analyzed and eliminated stepwise through a selection procedure in hop breeding (Cerenak, 2006), the four hop hybrids A1/54, A2/104, A3/112 and A4/122 and the reference variety were involved in a comparative model assessment. The hop hybrids had been selected among sets of seedlings analyzed and assessed as

En DEX (Bohanec, 2008), los dominios de valor son discretos; por tanto, la función f asigna todas las *combinaciones de los valores* $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ a los valores de Y . La asignación se presenta en un cuadro, donde cada fila da el valor de y para una combinación de valores $x \in X$. Las hileras también se llaman *reglas de decisión*, ya que cada hilera se puede interpretar como una regla "si-entonces" de la forma:

si $x_1=v_1$ y $x_2=v_2$ y ... y $x_n=v_n$ entonces $y=v$

donde $v_1 \in X_1, \dots, v_n \in X_n$ y $v \in Y$.

Las reglas definen la asignación de los cuatro atributos *Biología*, *Química*, *Morfología* y el *Valor de la elaboración* en la evaluación general de los híbridos de lúpulos para una combinación de valores de los cuatro atributos. Cada regla de decisión define el valor de la *Evaluación de los híbridos de lúpulos* para una combinación de valores de los primeros cuatro atributos. Debido a que la *Biología* y la *Química* pueden tomar cuatro valores diferentes, y la *Morfología* y el *Valor de la elaboración* pueden tomar tres valores (Cuadro 1), hay $4 \times 4 \times 3 \times 3 = 144$ combinaciones posibles; por tanto, hay 144 reglas de decisión.

El Cuadro 2 muestra las ponderaciones definidas por los expertos en mejoramiento y elaboración de la cerveza para cada atributo. Los dos atributos principales agregados, *Química* y *Valor de elaboración*, tienen la función más importante en la evaluación de los híbridos. La *Química* determina el tipo de variedad del lúpulo (aroma, tipo alfa o super-alfa), mientras que el *Valor de elaboración* incluye una característica de eliminación; por tanto, se les asignó ponderaciones relativamente altas, 35 % y 40 %.

Este método se ilustrará usando la función de utilidad que asigna la *resistencia* (x_1) y la *perspectiva de la planta* (x_2) a *Biología* (y). En este caso, todo el cuadro (Figura 2 abajo derecha) contiene nueve reglas. Sólo tres de ellas (reglas 1, 8 y 9) fueron

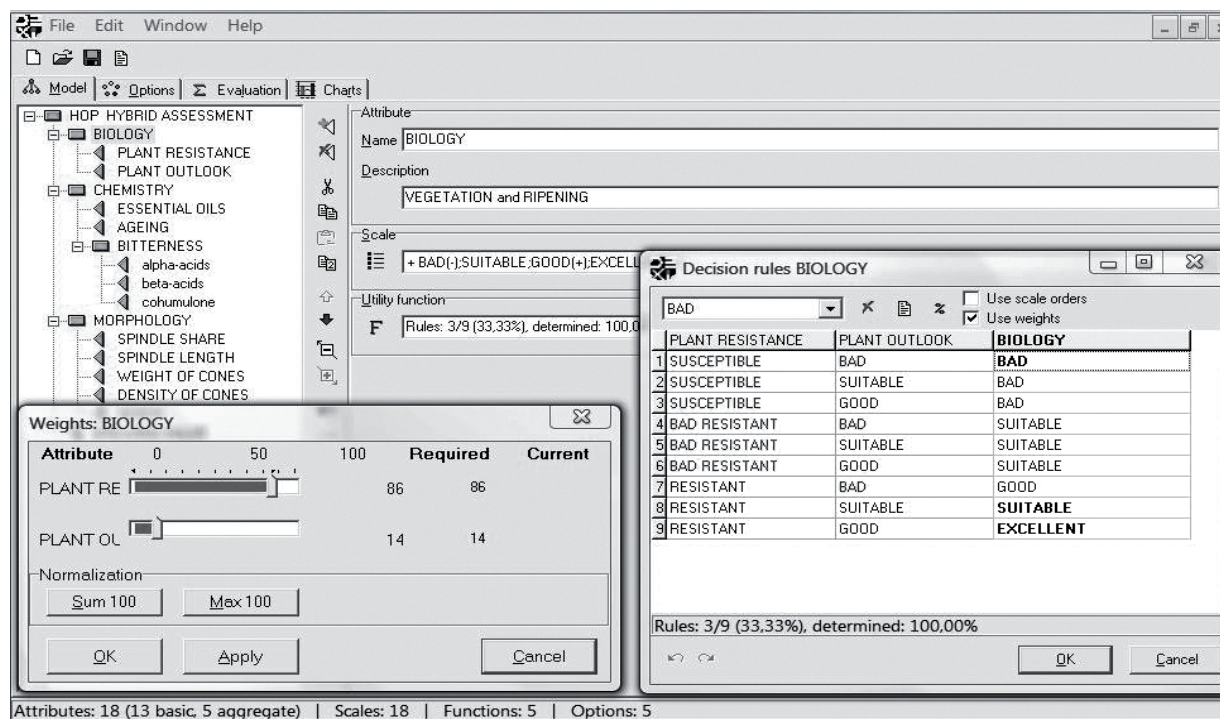


Figure 2. Determination of the model utility functions for the attribute *Biology*.
 Figura 2. Determinación de las funciones de utilidad del modelo para el atributo *Biología*.

significantly promising new hop varieties. Numerical data of analyses and measurements of hop cones as well as beer sensory estimation were used to describe hybrids' production and brewing quality parameters. They were analyzed, and the results were additionally discussed. The model enabled a final assessment of the hybrids based on the defined attributes and the decision rules within the defined utility functions.

All hop hybrids were described with fitting values, which were defined for each of the basic attributes. Furthermore, a list in which the hybrids were ranked in order of performance was created. This enabled a relative scoring system, in which hop hybrids or varieties could be compared against one another based on their performance. The level of importance was shown for each criterion within the assessment and pointed out differences among the hybrids analyzed. In addition, the model's results offered information for the next steps in the breeding process.

Based on the breeding experiences and the model results, assessments of overall as well as individual attributes were carried out. A3/112 and A4/122 reached the overall level of the reference variety and were thus assessed as appropriate for further breeding or commercial use. In contrast, A1/54 and A2/104 did

explicitamente definidas por los expertos (esto se indica con los valores en negrita en la columna de *Biología*). Estas tres reglas constituyen el conjunto inicial *S*. Además de ellas, el usuario también indicó (Figura 2 abajo izquierda) que las ponderaciones de los atributos *resistencia* y *perspectivas de la planta* deben ser $w_1=86\%$ y $w_2=14\%$.

Las reglas de decisión para la evaluación final de híbridos de lúpulos se definieron de acuerdo a las experiencias en mejoramiento de los usuarios del modelo. Las normas se determinaron teniendo en cuenta los valores mínimos y máximos de los cuatro atributos. Por ejemplo, el híbrido de lúpulos con los valores más bajos en todos los atributos tuvo el peor resultado en evaluación. Además, el híbrido de lúpulos que recibió la más alta evaluación fue el que obtuvo el conjunto de valores más altos, es decir, el híbrido con mejores perspectivas para mejoramiento futuro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de los híbridos

Entre todas las plantas de lúpulo analizadas y eliminadas por etapas a través de un procedimiento de mejoramiento de lúpulos (Cerenak, 2006), los cuatro híbridos de lúpulos A1/54, A2/104, A3/112 y A4/122 y la variedad de referencia participaron

not meet expectations in their attributes in relation to the reference variety. A2/104 was overall assessed as WORSE, while A1/54 was assessed as NON-PROSPECTIVE. Therefore, they were considered hybrids with less breeding potential in terms of agricultural and brewing values. All evaluation results for the model attributes are shown in detail in Table 3 and additionally discussed.

A3/112 and A4/122

The model results showed that A3/112 was assessed as the hybrid with the highest breeding potential. In *Biology*, this hybrid was assessed as EXCELLENT, in *Chemistry* as REFERENCE, in *Morphology* as ACCEPTABLE and in *Brewing value* as GOOD. In relation to the reference variety, this hybrid had a comparative advantage in *Biology* but also a comparative disadvantage in *Brewing value*. A comparison of the alpha-acids value, for example, for A4/112 and the reference variety marked them as equal. Furthermore, A3/112 was relatively superior in *ageing* (HSI), *plant resistance* and lower *cohumulone* attributes, which have the most important economic effects in terms of the hop price. By all quality parameters analyzed in the attribute *Brewing value*,

en una evaluación comparativa de los modelos. Los híbridos de lúpulos fueron seleccionados entre conjuntos de plántulas analizadas y evaluadas como significativamente nuevas y prometedoras variedades de lúpulo. Los datos numéricos de los análisis y mediciones de conos de lúpulos, así como la estimación sensorial de cervezas se utilizaron para describir la producción de híbridos y los parámetros de elaboración de la cerveza de calidad. Ellos fueron analizados y los resultados se discutieron adicionalmente. El modelo permitió una evaluación final de los híbridos basada en los atributos definidos y las reglas de decisión dentro de las funciones de utilidad establecidas.

Todas las variedades de lúpulo fueron descritas con valores de ajuste definidos para cada atributo básico. Además, se creó una lista en la que los híbridos se clasificaron en el orden de desempeño. Esto permitió un sistema de puntuación relativa, en el que los híbridos o variedades de lúpulo se pudieron comparar unos con otros, con base en su desempeño. Se mostró el nivel de importancia para cada criterio dentro de la evaluación y se señalaron las diferencias entre los híbridos analizados. Además, los resultados del modelo proporcionaron información para los próximos pasos a seguir en el proceso de mejoramiento.

Table 3. Test evaluation of hop hybrids analyzed.

Cuadro 3. Prueba de evaluación de híbridos de los lúpulos analizados.

Attribute	A1/54	A2/104	A3/112	A4/122	Ref. variety
Hop hybrid assessment	NON PROSPECTIVE	WORSE	REFERENCE	WORSE	REFERENCE
<i>Biology</i>	BAD	BAD	EXCELLENT	SUITABLE	SUITABLE
<i>plant resistance</i>	SUSCEPTIBLE	SUSCEPTIBLE	RESISTANT	BAD RESISTANT	BAD RESISTANT
<i>plant outlook</i>	SUITABLE	SUITABLE	GOOD	GOOD	SUITABLE
<i>Chemistry</i>	GOOD	REFERENCE	REFERENCE	REFERENCE	REFERENCE
<i>essential oils</i>	LESS	REFERENCE	REFERENCE	REFERENCE	REFERENCE
<i>ageing</i>	GOOD	EXCELLENT	EXCELLENT	GOOD	GOOD
<i>bitterness</i>	WORSE	REFERENCE	REFERENCE	REFERENCE	REFERENCE
<i>alpha-acids</i>	LESS	MORE	REFERENCE	MORE	REFERENCE
<i>beta-acids</i>	LESS	LESS	LESS	LESS	REFERENCE
<i>cohumulone</i>	MORE	REFERENCE	LESS	REFERENCE	REFERENCE
<i>Morphology</i>	BAD	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE
<i>spindle share</i>	BAD	BAD	ACCEPTABLE	BAD	GOOD
<i>spindle length</i>	BAD	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE	ACCEPTABLE
<i>weight of cones</i>	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD	GOOD
<i>density of cones</i>	BAD	BAD	BAD	BAD	BAD
<i>seeds</i>	BAD	BAD	BAD	BAD	ACCEPTABLE
<i>Brewing value</i>	BAD	BAD	GOOD	GOOD	EXCELLENT

A3/112 was equivalent to the reference variety. In hop aroma intensity and quality, A3/112 was assessed as inferior, but otherwise in bitterness intensity as equal to the reference variety (Table 3, Figure 3).

A4/122 was well balanced in its properties. In no attribute did this hybrid receive either outstanding (+) or disappointing (–) marks. Furthermore, compared with A3/112, A4/122 was equally ranked in the attributes *Chemistry*, *Morphology* and *Brewing value*. However, A3/112 was better ranked in the attribute *Biology*. The hybrid A4/122 and the reference variety were in the broad spectrum equally ranked, but in some of the attributes both were behind the characteristics of A3/112 (Table 3).

A2/104 and A1/54

In terms of model results, A2/104 took third place among the four hybrids analyzed. This hybrid was assessed as equal to the reference variety in *Chemistry* and *Morphology*. A2/104 had higher alpha-acid content than the reference variety; however, *Brewing value* was assessed with the model's lowest mark, BAD (Table 3). Furthermore, this hybrid had relatively the highest (non-desirable) content of polyphenols as well as the lowest sensory assessment value in hop aroma intensity and bitterness intensity.

Hybrid A1/54 was assessed as GOOD in terms of the attribute *Chemistry*; however, even in that attribute, it ranked behind the other three hybrids analyzed. A1/54 was also ranked the lowest with BAD in *Brewing value*, the most important attribute. This hybrid required the highest quantity of hops needed within the brewing process. The sensory beer

Con base en las experiencias de mejoramiento y los resultados del modelo, se realizaron evaluaciones de los atributos generales y de los individuales. A3/112 y A4/122 alcanzaron el nivel global de la variedad de referencia y fueron evaluados como apropiados para su mejoramiento futuro o uso comercial. Por el contrario, A1/54 y A2/104 no cumplieron con las expectativas en sus atributos en relación con la variedad de referencia. A2/104 fue evaluado en general como PEOR, mientras que A1/54 se evaluó como SIN FUTURO. Por tanto, fueron evaluados como híbridos con un menor potencial de mejoramiento en términos de valor agrícola y de elaboración de la cerveza. Todos los resultados de la evaluación de los atributos del modelo se muestran en detalle en el Cuadro 3, y se discuten adicionalmente.

A3/112 y A4/122

Los resultados del modelo mostraron que A3/112 se evaluó como el híbrido con mayor potencial de mejoramiento. En *Biología*, este híbrido fue evaluado como EXCELENTE, en *Química* como REFERENCIAL, en *Morfología* como ACEPTABLE y en el Valor de elaboración como BUENO. Respecto a la variedad de referencia, este híbrido tuvo una ventaja comparativa en la *Biología*, pero también una situación de desventaja comparativa en el *Valor de elaboración*. Una comparación entre el valor de los alfa-ácidos, por ejemplo, para A4/112 y la variedad de referencia los evaluó como iguales. Además, A3/112 fue relativamente superior en *envejecimiento* (HSI), *resistencia de la planta* y en los atributos bajos en *cohumulona*, que son los más importantes económicamente en términos

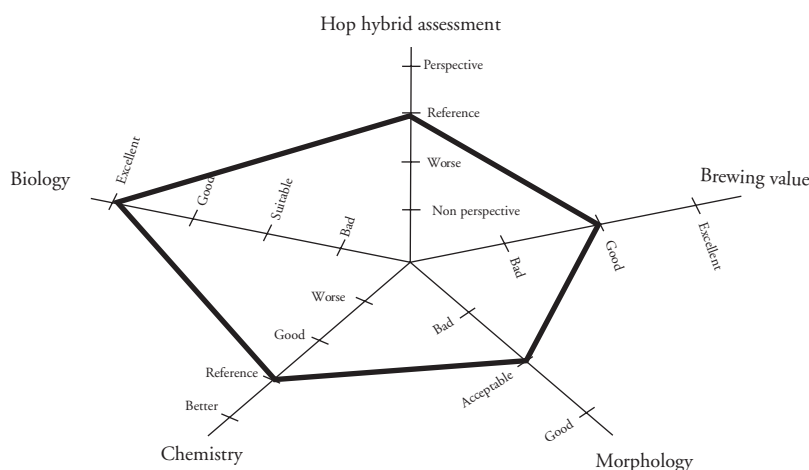


Figure 3. Model evaluation of the hop hybrid A3/112.

Figura 3. Modelo de evaluación del híbrido de lúpulos A3/112.

taste results ranked A1/54 at the bottom. Among all the hybrids, A1/54 scored the lowest marks in hop aroma and bitterness quality, which also resulted in the lowest mark BAD obtained for the *Brewing value*. That placed this hybrid in fourth place among the hybrids analyzed (Table 3).

CONCLUSIONS

Despite minor deficiencies such as the use of qualitative data only, we found that this approach fulfilled most of the breeders' expectations and revealed considerable advantages in comparison with other approaches. The multi-attribute model can therefore be regarded as a useful supplementary tool for hop hybrids assessment.

This method cannot entirely replace experts in breeding and brewing but can serve as an additional instrument in decision-making, since the decisions based on model testing offered much faster results that validated the application of the model for further research. In the future, data about new upcoming hybrids will be added and assessed in comparison with experts' decisions. Furthermore, we also expect to upgrade the model by adding new attributes in response to new goals in hop breeding programs.

LITERATURE CITED

- ASBC, 1992. American Society of Brewing Chemists. Methods of Analysis. 8th ed. H – 6,12. The Society, St. Paul, MN.
- Analytica EBC, 1998. European Brewery Convention. Grundwerk: Section 7. EBC Analysis Committee, Hans Carl Getraenke Fachverlag, Nuernberg, Germany. 33 p.
- Bohanec, M., and B. Zupan. 2004. A function-decomposition method for development of hierarchical multi-attribute decision models. *Decis. Support Syst.* 36: 215-233.
- Bohanec, M., J. Cortet, B. Griffiths, M. Znidarsic, M. Debeljak, S. Caul, J. Thompson, and P.H. Krogh. 2007. A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia* 51(3): 207-218.
- Bohanec, M. 2008. DEXi: Program for multi-attribute decision making, User's manual, Version 3.00. IJS Report DP-9989, Jožef Stefan Institute, Ljubljana. <http://kt.ijs.si/MarkoBohanec/pub/DEXiManual30r.pdf> (Accessed: July 2008).
- Bohanec, M., A. Messean, S. Scatasta, F. Angevin, B. Griffiths, P.H. Krogh, M. Znidarsic, and S. Dzeroski. 2008. A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecol. Model.* 215: 247-261.
- Cerenak, A. 2006. Hop breeding. Final project report. Slovenian institute of hop research and brewing. Contract Nr. 2311-05-000090. 59 p.

del precio del lúpulo. En todos los parámetros de calidad analizados, en *valor de elaboración*, A3/112 fue equivalente a la variedad de referencia. En la intensidad de aroma y calidad del lúpulo, A3/112 fue evaluado como inferior, pero en la intensidad del amargor fue considerado como igual a la variedad de referencia (Cuadro 3, Figura 3).

A4/122 estuvo bien equilibrado en sus propiedades. Este híbrido no recibió calificación de sobresaliente (+) ni de decepcionante (-) en ninguno de los atributos. Además, en comparación con A3/112, el híbrido A4/122 alcanzó el mismo nivel en los atributos *Química*, *Morfología* y *Valor de elaboración*. Sin embargo, A3/112 se clasificó mejor en el atributo de *Biología*. El híbrido A4/122 y la variedad de referencia se clasificaron con igual rango en el amplio espectro, pero en algunos atributos ambos estuvieron por debajo de las propiedades de A3/112 (Cuadro 3).

A2/104 y A1/54

En cuanto a los resultados del modelo, A2/104 ocupó el tercer lugar entre los cuatro híbridos analizados. En *Química* y *Morfología*, este híbrido fue evaluado en el mismo rango que la variedad de referencia. El A2/104 tuvo un mayor contenido de alfa-ácido que la variedad de referencia. Sin embargo, el *Valor de elaboración* de A2/104 se evaluó con la calificación más baja del modelo, MALO (Cuadro 3). Además, este híbrido tuvo el contenido relativamente más alto (no deseable) de polifenoles, así como el valor más bajo de evaluación sensorial en cuanto a la intensidad de aroma y de amargor del lúpulo.

El híbrido A1/54 fue evaluado como BUENO en términos del atributo *Química*; sin embargo, incluso en ese atributo estuvo por debajo de los otros tres híbridos analizados. A1/54 se clasificó también con el nivel más bajo, MALO, en el *Valor de elaboración*, el atributo más importante. Este híbrido requirió la mayor cantidad de lúpulos en el proceso de elaboración de la cerveza. Los resultados de degustación sensorial de la cerveza colocó a A1/54 en el rango más bajo. Entre todos los híbridos, A1/54 obtuvo las puntuaciones más bajas en el aroma del lúpulo y calidad del amargor, lo cual también dio lugar a la calificación más mala para el *Valor de elaboración*; esto lo desplazó al cuarto lugar, entre los híbridos analizados (Cuadro 3).

- De Keukleire, D. 1999. Fundamentals of beer and hop chemistry. *Quimica Nova* 23(1): 108-112.
- Javornik, B., J. Jakse, N. Stajner, P. Kozjak, and A. Cerenak. 2005. Molecular genetic hop (*Humulus lupulus* L.) research in Slovenia. *Acta Hort.* (ISHS) 668: 31-34.
- Lemmens, G. W. C. 1998. The breeding and parentage of hop varieties. *Brew. Dig.* 73(5): 16-26.
- MEBAK. 2002. Brautechnische Analysenmethoden, Band II. Methodensammlung der Mitteleuropäischen Brautechnischen Analysenkommission Weihenstephan. 332 p.
- Pavlovic, M., F. N. Koumboulis, M. P. Tzamtzi, and C. Rozman. 2008. Role of automation agents in agribusiness decision support systems. *Agrociencia* 42(8): 913-923.
- Pavlovic, V., A. Cerenak, M. Pavlovic, and C. Rozman. 2007. Use of numerical methods in hop breeding – concept of an expert system. *Hmeljarski bilten* 14: 11-17.
- Pazek, K., C. Rozman, A. Borec, J. Turk, D. Majkovic, M. Bavec, and F. Bavec. 2006. The Use of multi criteria models for decision support on organic farms. *Biol. Agric. Hort.* 24 (1): 73-89.
- Pazek, K., and C. Rozman. 2007. The Decision support system for supplementary activities on organic farms. *Agricultura* 5(1): 15-20.
- Radisek, S., A. Cerenak, and B. Javornik. 2007. Hop disease resistance breeding: Procedures and techniques in selection of seedlings. *Hmeljarski bilten* 14: 5-10.
- Rozman, C., and K. Pazek. 2005. Application of computer supported multi-criteria decision models in agriculture. *Agric. Consec. Sci.* 70(4): 127-134.
- Rozman, C., K. Pazek, M. Bavec, F. Bavec, J. Turk, and D. Majkovic. 2006. The Multi-criteria analysis of spelt food processing alternatives on small organic farms. *J. Sustainable Agric.* 28(2): 159-179.
- Scatasta, S., J. Wesseler, M. Demont, M. Bohanec, S. Dzeroski, and M. Znidarsic. 2007. Multi-Attribute modeling of economic and ecological impacts of agricultural innovations on cropping systems. *J. Systemics, Cybernetics and Informatics* 4(2): 52-59.
- Seigner, E., A. Lutz, H. Radic-Miehle, S. Seefelder, and F. G. Felsenstein. 2005. Breeding for powdery mildew resistance in hop (*Humulus lupulus* L.). Strategies at the Hop Research Center, Huell, Germany. *Acta Hort.* (ISHS) 668: 19-31.
- Znidarsic, M., M. Bohanec, and B. Zupan. 2006. proDEX - a DSS tool for environmental decision-making. *Environ. Model. Softw.* 21(10): 1514-1516.
- Znidarsic, M., and M. Bohanec. 2007. Automatic revision of qualitative multi-attribute decision models. *Fund. Computing Decis. Sci.* 32(4): 315-326.

CONCLUSIONES

A pesar de deficiencias menores, como sólo el uso de datos cualitativos, se encontró que este enfoque cumplía con casi todas las expectativas de los agricultores y puso de manifiesto las ventajas considerables que tenía en comparación con otros enfoques. El modelo de atributos múltiples puede entonces considerarse como una herramienta complementaria útil para la evaluación de híbridos de lúpulos.

Este método no puede reemplazar totalmente a los expertos en mejoramiento y elaboración de la cerveza, pero puede servir como un instrumento adicional en la toma de decisiones, ya que las decisiones sobre la base de pruebas del modelo proporcionaron resultados mucho más rápidos, los cuales validaron la aplicación del modelo para más investigaciones. En el futuro, datos sobre nuevos híbridos se agregarán y evaluarán para contrastarlos con las decisiones de los expertos. Además, también se espera mejorar el modelo mediante la adición de nuevos atributos, como respuesta a nuevas metas en los programas de mejoramiento de los lúpulos.