

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Multicriteria evaluation and agro-climatic suitability of growing sugar cane in the Huasteca region of Mexico

Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México)

Noé Aguilar Rivera^{1,2}, Guadalupe Galindo Mendoza², Javier Fortanelli Martínez², Carlos Contreras Servín²

ABSTRACT

Sugarcane production is one of the most important activities in the Huasteca region of Mexico, which requires plans to increase productivity and reduce uncertainty caused by limitations and the market. By zoning the crop using a multi-criteria evaluation AHP (analytic hierarchy process) in GIS (Landsat 7 ETM+), thematic maps (climate and soil) were generated associated with the variables of cane using ILWIS and ESRI ArcGIS 9.2. The AHP methodology provides a framework for assessing and zoning the crop in order to synthesize the interaction between the variables that determine crop productivity and represent the key point of agronomic management of space in Huasteca. The results showed that the methodology of remote sensing, GIS and AHP, can also serve as an effective, low cost tool.

Keywords: remote sensing, zoning, analytic hierarchy process.

RESUMEN

La caña de azúcar es una de las más importante actividades productivas en la región Huasteca de México y que requiere de planes para incrementar la productividad y disminuir la incertidumbre ante las limitaciones y el mercado. Mediante la zonificación productiva potencial del cultivo a través de una evaluación multicriterio AHP (proceso de jerarquías analíticas) en un ambiente SIG (Imgenes Landsat 7 ETM+), se generaron mapas temáticos (climáticos y edafológicos) relacionados con las variables del cultivo de caña empleando ILWIS y ESRI ArcGis 9.2. La metodología AHP proporcionó el marco de evaluación y la zonificación del cultivo al sintetizar la interacción entre las variables que determinan la productividad del cultivo y representan el punto clave del manejo agronómico espacial en Huasteca. Los resultados demostraron que la metodología de percepción remota, AHP y SIG, pueden servir además como herramienta efectiva, de bajo costo.

Palabras clave: percepción remota, zonificación, proceso de jerarquía analítica.

INTRODUCCIÓN

Para determinar el potencial productivo de las zonas cañeras en México, los estudios de regionalización, zonificación y lotificación se encuentran limitados por la baja disponibilidad de información, tanto estadística como cartográfica, en relación al medio físico y las potencialidades de diversas regiones productoras de caña de azúcar; la información temporal y espacial ha sido tradicionalmente limitada y con actualización irregular. Además de los trabajos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática – INEGI, es difícil encontrar otra fuente de información que proporcione datos o documentación confiable y útil, para la toma de decisiones de planeación y gestión de actividades productivas de gran heterogeneidad (Aguilar y Zulueta, 1993; Medina *et al.*, 1997; Ruiz *et al.*, 2005; Salgado-García *et al.*, 2008; Salgado-García *et al.*, 2010).

El primer paso en la estimación, optimización de la producción, transporte y en el uso de los recursos de la biomasa cañera es la comprensión del potencial de

Fecha de recepción 2010-05-10
Fecha de aceptación 2010-09-23

¹ Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana. Córdoba, México. naguilar@uv.mx

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.

las tierras agrícolas para producir caña de azúcar. Sin embargo, las mediciones sobre el terreno no se pueden hacer con detalle suficiente para la distribución espacial, prefiriéndose realizar estimados de producción mediante análisis estadístico y por su complejidad de evaluación debe abarcar aspectos de varias metodologías y disciplinas (Krishna *et al.*, 2002; Elmorea *et al.*, 2008). Begue (2008) y Ji-Hua (2008) mencionan que la variabilidad en el crecimiento y, por ende, en la productividad del cultivo de caña de azúcar (que representaría la energía efectivamente utilizada en el proceso de fotosíntesis), está relacionada con múltiples factores complejos que pueden ser dependientes o independientes del tiempo (figura 1).

Según Johnson *et al.* (2008), la importancia económica de la caña de azúcar justifica los estudios de la variabilidad espacial. Los objetivos de la zonificación siempre se relacionan con la clasificación y representación espacial de la aptitud y las limitaciones del lugar con respecto a un determinado uso, para mejorar la situación existente, ya sea incrementando la producción o limitando la degradación de los recursos, las cuales surgen de la sobreposición espacial de información de variables tales como suelo, clima, cultivo y otras clasificadas en intervalos de clase.

Ante esta situación, las técnicas de percepción remota (PR), imágenes satelitales (Lansat, Spot, NOAA, etc.), sistemas de información geográfica (SIG) y los sistemas de posicionamiento global (GPS), son herramientas útiles en la identificación y monitoreo de grandes áreas agrícolas en la estimación de la producción, detección de enfermedades y riesgos ambientales (estrés), mapeo

de zonas productivas, direccionamiento del muestreo para diversos fines y observaciones en campo basados en la variabilidad espacial del suelo, clima y parámetros de campo de los cultivos que brindan la posibilidad de vincular espacialmente distintas fuentes de información (Abdel-Rahman y Ahmed, 2008; Hatfield *et al.* 2008; Salgado-García *et al.*, 2008). De esta forma se evita el avance o expansión cañera sobre zonas de aptitud agrícola marginales.

Sin embargo, Scarpari y Beauclair (2004) mencionaron que para evaluar el potencial de cultivo de la caña de azúcar podemos considerar tres aspectos de impacto climático en el sistema de producción de la maduración y el rendimiento cañero. En primer lugar, el clima determina directamente el proceso de crecimiento y la cantidad de biomasa y azúcar producidos. Segundo, las condiciones climáticas adversas influyen en el desarrollo de enfermedades y plagas en el cultivo que restringen su desarrollo. Tercero, el clima, en particular la lluvia, determina el exceso o escasez de agua. Razón por la cual es necesario determinar el peso específico de cada variable, para propósitos de manejo de los factores controlables, lo que implica el diseño de nuevas metodologías y esquemas de planeación para incrementar la productividad.

Aunque existen modelos para caña de azúcar como canegro, auscane, century, canesim, mosicas, sucette, sucros y qcane (O'Leary, 1999; Galdos, 2010), el análisis multicriterio proporciona el marco adecuado para la integración de los distintos factores (medio ambiente, economía y sociedad) que intervienen de forma espacial en

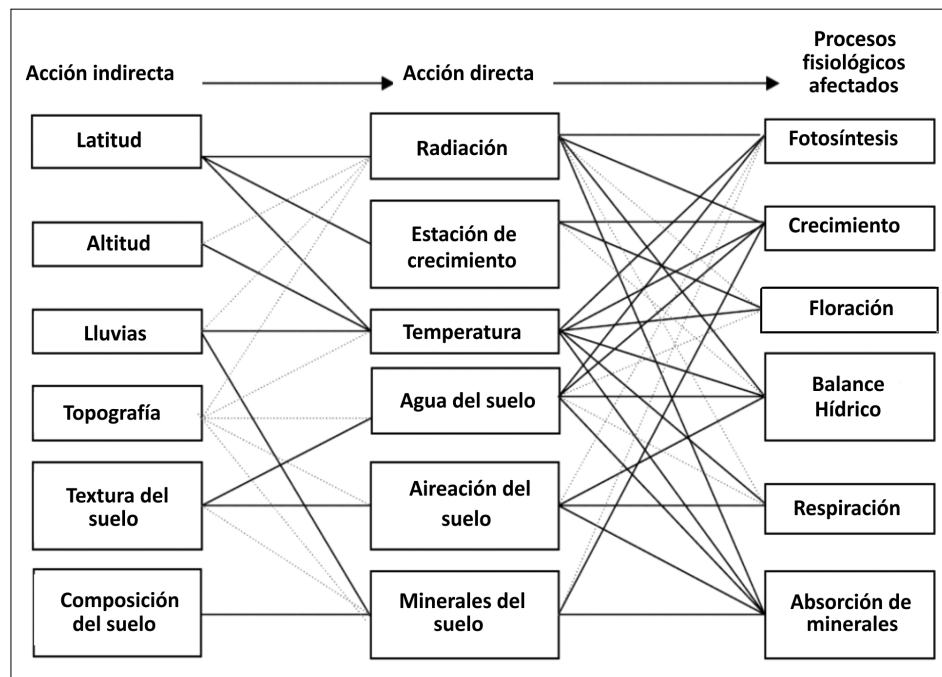


Figura 1. Factores de producción de la caña de azúcar (Moore, 2009)

la aptitud del suelo para cada uso productivo. El método de jerarquías analíticas (*Analytic Hierarchy Process* - AHP) ha sido incorporado en distintas aplicaciones SIG para la realización de análisis de aptitud (Santé y Crecente, 2005).

Para Berumen y Llamazares (2007) son mayores los esfuerzos en eficiencia y productividad por parte de las empresas, y en especial del sector industrial. En el caso agropecuario la necesidad en la adopción de metodologías de apoyo en la toma de decisiones, y en general, en el fomento de la competitividad, en particular, en escenarios donde intervienen múltiples variables o criterios de selección, las condiciones actuales que imperan en el entorno se distinguen por la rapidez y la intensidad con las que se suscitan los cambios, lo cual implica que los agentes económicos estén obligados a tomar decisiones constantemente (y a asumir sus consecuencias), que dependen de múltiples criterios o atributos de tipo cuantitativo, cualitativo o de una mezcla de ambos. Lo anterior lleva a reconocer que cada vez es más necesaria la utilización de metodologías que permitan reducir o atemperar el riesgo que suponen las conjeturas y supuestos improvisados en el afán de alcanzar mejores niveles de competitividad en el seno de las empresas, los sectores industriales y las regiones.

Evaluación multicriterio (EMC) de la zona cañera

La evaluación multicriterio (EMC) se basa en la ponderación y compensación de variables, ya sean determinantes o factores de aptitud. La EMC permite obtener mapas que expresan la evolución potencial para cada categoría en el uso del suelo o sistemas productivos (es necesario caracterizar ambientes con condiciones similares o zonas agroecológicas, que expresen el potencial productivo de la zona). La aplicación del módulo EMC exige, por último, la indicación de pesos o ponderaciones para cada factor (Gómez y Barredo, 2005; Sipahi y Mehpare, 2010).

Estos métodos están basados según Malczewski (1996) en la teoría de la decisión para explicar y predecir el comportamiento de los agentes que toman la decisión y los indicadores económicos. Un problema multicriterio, con un discreto número de alternativas, puede ser explicado según Falconi y Burbano (2004) en: A , conjunto finito de n alternativas o acciones posibles; G , conjunto de las m funciones de evaluación g_i , $i=1,2,\dots,m$ asociadas a los criterios de evaluación o puntos de vista, considerados relevantes en el problema de decisión. Si A es una alternativa, $g_i(A)$ es su evaluación en el i -ésimo criterio. En esta forma, un problema de decisión puede ser representado en una matriz P de m filas y n columnas denominada matriz de evaluación o impacto, cuyos elementos p_{ij} ($i=1,2,\dots,m$;

$j=1,2,\dots,n$) representan la evaluación de la alternativa j -ésima en el i -ésimo criterio (Gómez y Barredo, 2005).

		Alternativas		
		A_1	A_2	A_3
Criterios	C_1	P_{11}	P_{12}	P_{13}
	C_2	P_{21}	P_{22}	P_{23}
	C_3	P_{31}	P_{32}	P_{33}
	C_4	P_{41}	P_{42}	P_{43}

- Si a y b son dos alternativas, la alternativa a es mejor que la alternativa b , según el i -ésimo criterio o punto de vista, si $g_i(a) > g_i(b)$.
- La alternativa a domina a la alternativa b , si a es al menos tan buena como b para todos los criterios que están siendo considerados, y mejor que b al menos en un criterio.

Es decir, cada variable o factor temático deben ser estructurados como una matriz, en la cual los criterios ocupan las filas de la matriz y las alternativas propias de cada criterio ocuparán las columnas para posteriormente determinar el eigenvector principal, el cual establece los pesos (w_j); y el eigenvalor, que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores (Mena *et al.*, 2006).

La integración de la EMC y los SIG genera una herramienta para asistir procesos de análisis espacial en gestión ambiental, a través de la construcción de mapas temáticos, derivados de bases de datos geográficas y territoriales en especial para la asignación/localización de actividades productivas generándose una serie de posibilidades de aplicación en SIG, y pudiendo asistir de manera eficaz a procesos de planificación y ordenación del territorio, o bien realizando operaciones de localización/asignación tomando en cuenta diversos criterios y múltiples objetivos (Gómez y Barredo, 2005). Para la caña de azúcar, la EMC establece un indicador confiable que permite diagnosticar los sistemas productivos regionales buscando identificar sus factores determinantes y compararlos dentro de un mismo criterio de evaluación que envuelve aspectos de clima, suelo y factores socioeconómicos dando un carácter cuantitativo a las evaluaciones realizadas (Marin *et al.* 2009, 2008). El objetivo de este trabajo fue zonificar el cultivo de caña de azúcar en Huasteca (México), mediante la técnica de evaluación multicriterio en un ambiente SIG para determinar espacialmente el peso de los factores limitantes a la productividad del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el estado de San Luis Potosí, específicamente en la región "Huasteca Potosina", la superficie de cultivo de caña

de azúcar para ingenios azucareros está ubicada en la parte oriental del estado, entre los 19° 51' y 21° 34' N y 15° 54' y 116° 56' W, región de barlovento de la Sierra Madre Oriental. Se define por ser el límite boreal de las selvas mexicanas y presentar la línea divisoria entre Aridoamérica y Mesoamérica. Estas conforman dos subcuencas hidrográficas (Ríos Valles y Moctezuma). Estas características físicas han permitido el desarrollo de actividades agropecuarias, sobre todo la de caña de azúcar (Galindo *et al.*, 2009) en los municipios productores (figura 2).

Las variedades de caña, actualmente cultivadas en Huasteca, provienen en gran parte de hibridaciones producidas en el país y de algunas introducidas de otros países, Mex 69-290, CP 72-2086, Mex 79-431, Mex 68-P-23, CO 997, ZMex 55-32, MY 55-14, Mex 57-473, SP 70-1284, RD 75-11, CP 44-101, Mex 68-1345, Mex 69-749, sin embargo predomina la variedad CP 72-2086 (21,0%) y ZMEX 55-32 (50,6%). La disponibilidad de agua en la forma de riego es baja (27,8%). Los suelos predominantes son del tipo Vertisol Pelico con el predominio de pendientes de 0 a 20%

de tipo llano o casi llano a moderadamente escarpado. El clima dominante es (A)Cm (Semi-cálido húmedo con temperatura media anual de 18 a 22°C), Aw1 (muy cálido subhúmedo con temperatura media mayor de 18°C) y Am (cálido húmedo con temperatura media anual de 18 a 22°C). El tamaño de explotación promedio es de 4 ha. Huasteca se ubicó a nivel nacional entre los primeros 3 productores de este cultivo y de azúcar y dentro de los estados de menor rendimiento de campo y agroindustrial con un promedio anual de 56 t ha⁻¹, el cual disminuyó para la zafra 2008-2009 a 51 t ha⁻¹ y 44 t ha⁻¹ para la zafra 2009-2010.

El estudio se basó en el muestreo preliminar de campo para georeferenciar los cuatro ingenios azucareros existentes (Alianza Popular, Plan de Ayala, San Miguel El Naranjo y Plan de San Luis) para la construcción de un polígono cañero partiendo de puntos de control o parcelas ubicados (70) en la zona cañera para identificar la respuesta espectral y la interpretación visual del espacio en mapas derivados de imágenes Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) 2.645, 2.745 y 2.744 (órbita/punto) del año 2008 con resolución espacial de 30 x 30 m las cuales fueron corregidas geográficamente empleando el Datum Norteamericano de 1927 y la proyección transversal de Mercator (UTM zona 14 Norte). Para el procesamiento digital de las imágenes fue empleado el software ILWIS 3.3 (Integrated Land and Water In-

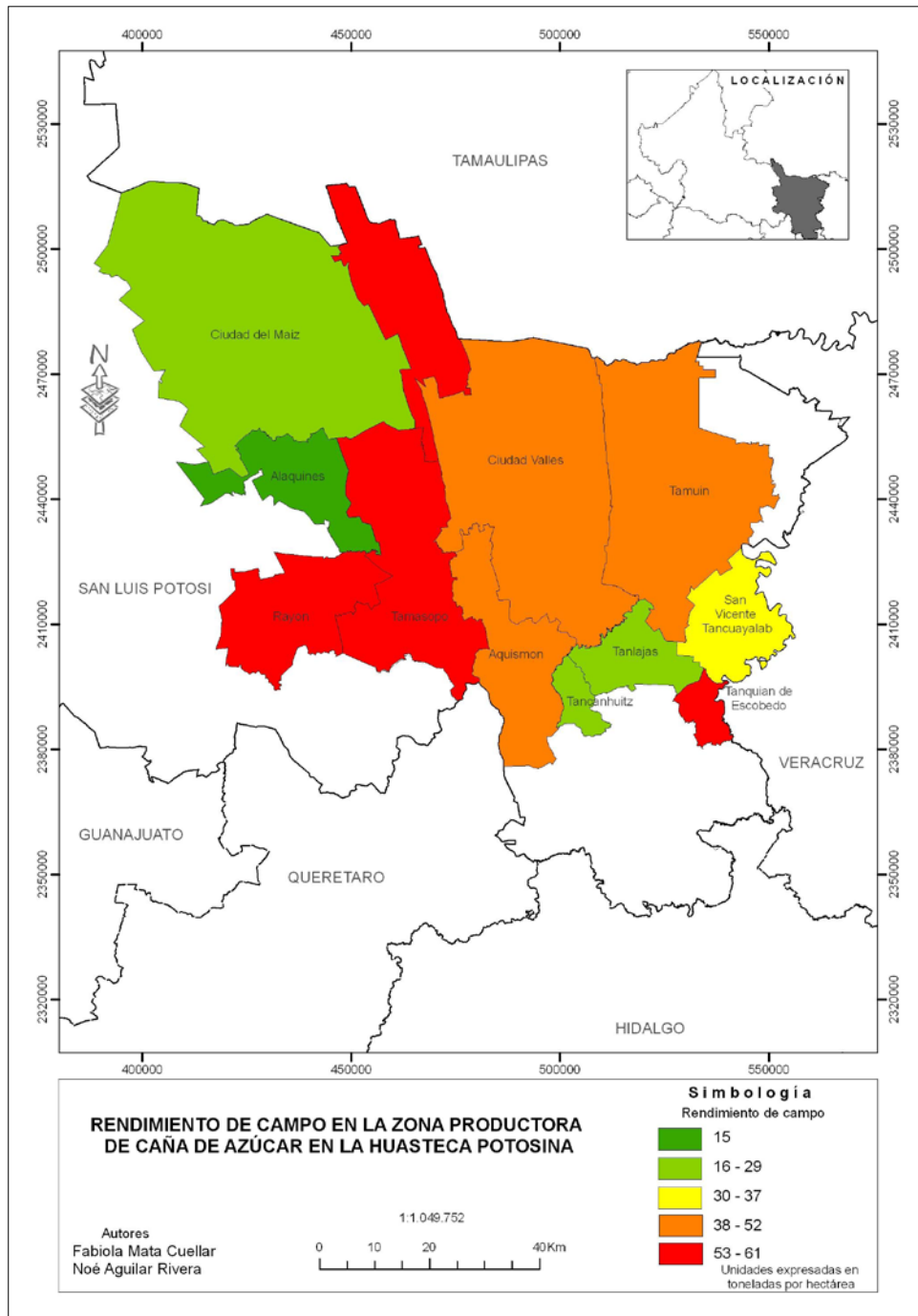


Figura 2. Municipios productores y rendimiento de caña de azúcar en Huasteca (México)

formation System, ITC, ILWIS System). Estas imágenes fueron utilizadas con el propósito de seleccionar píxeles que indiquen la presencia de caña de azúcar y establecer los límites para la zona agrícola (polígonos digitales) de otros usos de acuerdo a la metodología de Rudorff *et al.* (2010) (figura 3).

Se llevo a cabo la construcción de mapas temáticos tomando en cuenta los requerimientos climáticos y edáficos del cultivo (temperaturas, régimen de lluvias, índice de severidad a la sequía, climas, suelos, altitud y pendiente) para la zona de estudio (tabla 1); como factores base para el cálculo del desarrollo del cultivo y la posterior delimitación de las

áreas con aptitud potencial similares, se utilizó el software ArcMap ESRI ArcGis 9.2, de acuerdo a la metodología de Marin *et al.* (2009), Galindo *et al.* (2009), Jiménez *et al.* (2004) y Cengicaña (2004) (figura 4).

El procedimiento de ponderación y comparación de dichos factores de aptitud (tabla 1), se llevo a cabo utilizando el método de evaluación multicriterio AHP desarrollado por Saaty en 1977 (Díaz y Blanco, 2000) como técnica abierta y flexible que permite la adecuada modelización de problemas con alta complejidad utilizado con gran éxito en la solución de problemas de toma de decisiones por su sencillez y robustez en los resultados (De Abreu *et al.*, 2000).

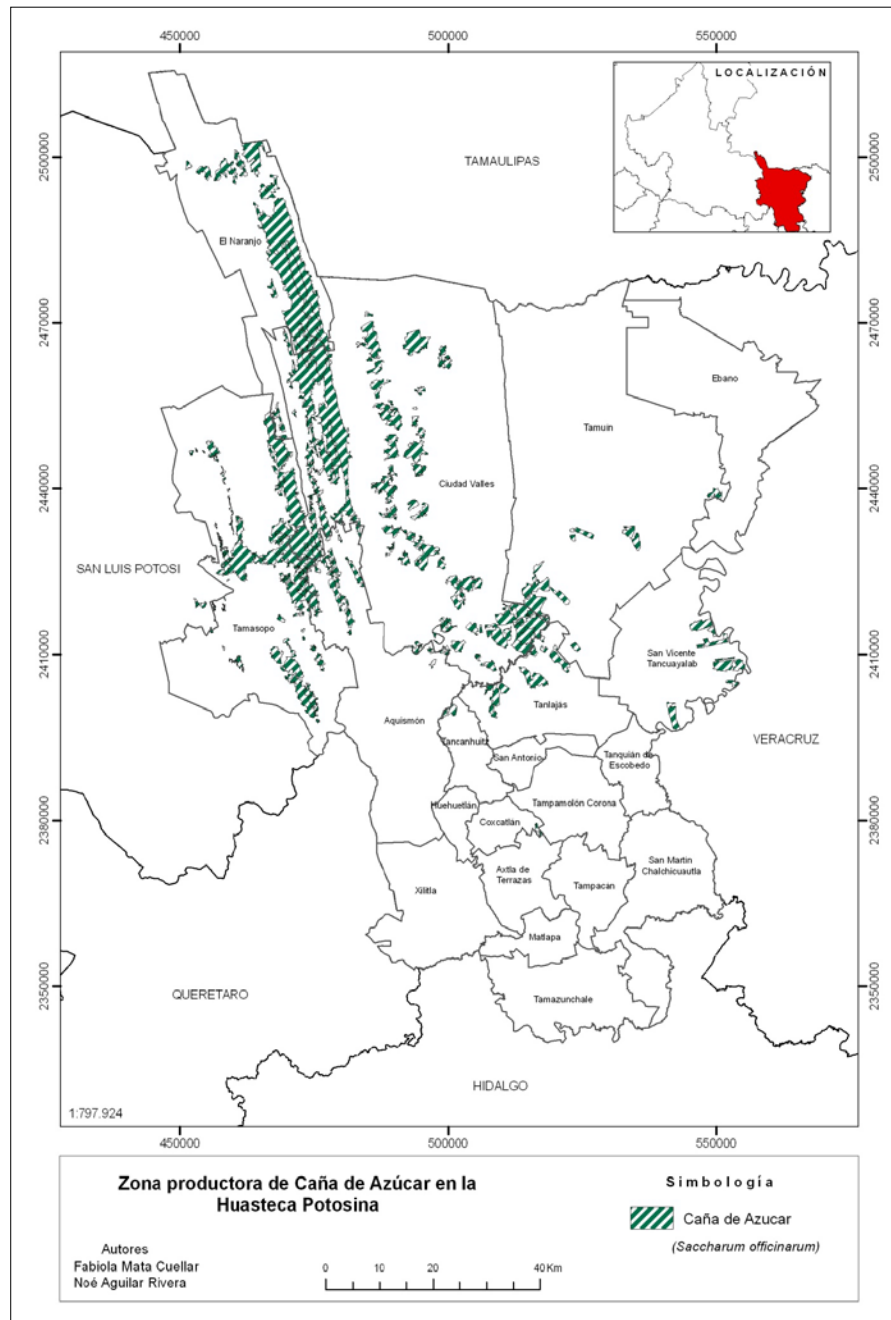


Figura 3. Distribución espacial de la zona cañera de Huasteca (México)

En este sentido, el proceso de ponderación por el método AHP como integración de la Geomática y EMC, ofrece la posibilidad de compensación de una variable con otra, por el grado de importancia relativa, lo que hace posible la generación de nuevos escenarios para el mismo objetivo con la revisión y cambio en la matriz de comparación por pares. Saaty (2001) estableció que el análisis que realiza el método para reducir la subjetividad, consiste en determinar matemáticamente el grado de importancia o peso de los distintos elementos del modelo jerárquico. El método AHP se sustenta sobre los axiomas juicios recíprocos y homogeneidad de los elementos, es decir los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud y estructura jerárquica (Freitas *et al.*, 2006), este método ha sido empleado en caña de azúcar principalmente en la selección de variedades (Gomes y Nunes, 1999), en el diseño de estrategias para incrementar la competitividad (Giannotti, 2003; Castellanos y Van Westen, 2007) y en proyectos de bioetanol y bioenergía (Quintero *et al.*, 2010).

La importancia relativa de cada uno de los factores o la aptitud al cultivo de caña, permitió manejar una gran cantidad de información espacial del cultivo (información cartográfica, temática y estadística emanada de estudios realizados en el sector con la condicionante de la representatividad espacial) para ser valorada mediante la construcción de una matriz de comparación por pares de factores (pareada), derivado de los datos obtenidos en la tabulación de la superposición de mapas y el posterior cálculo de esa matriz para asignar un peso o valor distinto

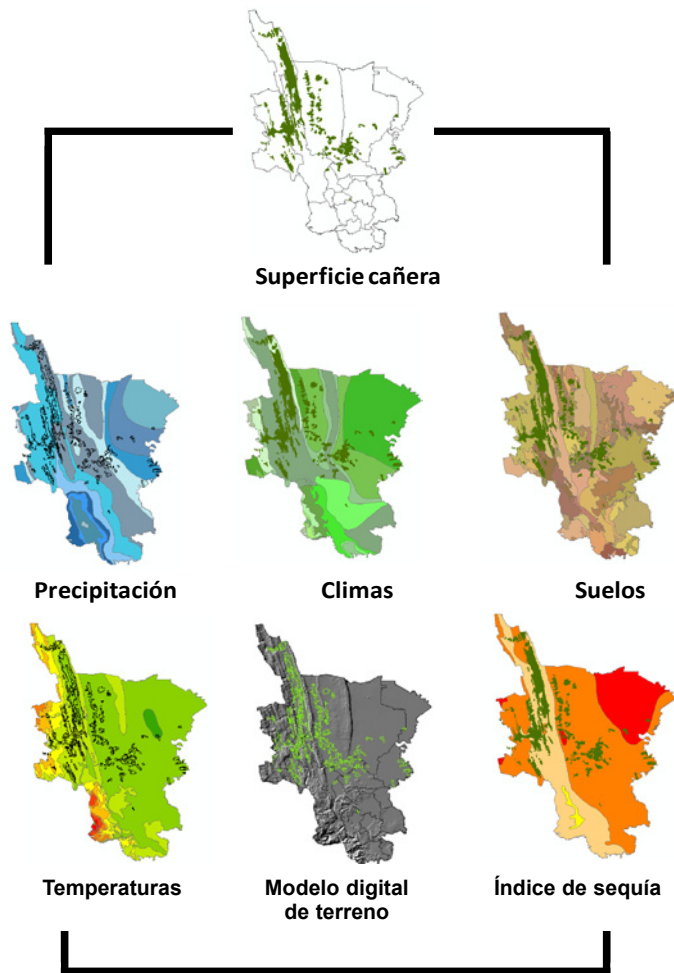


Figura 4. Mapas temáticos empleados en la evaluación de la productividad cañera (escala 1:50.000) Huaste (México)

a cada uno de los factores (matriz o vector de prioridades, que expresa la importancia relativa de cada criterio, o peso) (Saaty 2001), previa transformación para la utilización de los temas geográficos como variables espaciales, donde cada uno de esos pares posibles (unidades espaciales) fue comparado y calificado, aplicando una escala continua de 17 jerarquías de importancia relativa dentro del módulo AHP del *software* ESRI ArcGis 9.2 y Expert Choice 11.5 (figura 5 y tabla 2) para calcular los pesos de los fac-

Tabla 1. Nivel de aptitud al cultivo de caña (Sánchez *et al.*, 2002, Subiros, 2000)

Variable	Nivel de aptitud al cultivo de caña			
	Alta	Media	Baja	No apta
Temperatura promedio anual (°C)	22-32	20/22-32/35	18-20	<18
Precipitación media anual (mm)	>1.500	1.250-1.500	1.250-1.000	<1.000
Pendiente (%)	0-8	8-16	16-30	>30
Altitud (msnm)	Hasta 400	400-850	850-1.300	>1.300
Índice de severidad de sequía	Leve	Moderada	Fuerte a muy fuerte	Severa
Rendimiento esperado (t ha ⁻¹)	>80	80-55	55-40	<40

tores y desarrollar una representación espacial, se generó un mapa tipo ráster de los ingenios azucareros y zonas de abasto. Posteriormente, estos archivos pasaron a formar parte de las coberturas ráster con las cuales se construyó el modelo en relación a su aptitud para el cultivo de caña bajo condiciones de temporalidad.

Tabla 2. Escala de evaluación en AHP

Valor	Escala de Saaty (1990)
	Significado
9	A es extremadamente más importante que B
7	A es mucho más importante que B
5	A es más importante que B
3	A es levemente más importante que B
1	A y B tienen la misma importancia
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes

Obtenidas las prioridades totales de las alternativas, AHP permite evaluar la inconsistencia del decisor a la hora de emitir sus juicios. Cuando la medida de inconsistencia fijada para el procedimiento de priorización supera un determinado umbral de acuerdo a la medida propuesta por Saaty (2001) para evaluar la inconsistencia representado por el índice de consistencia (IC) o el error de una matriz pareada, si es menor al 10% (índice $\leq 0,1$) la inconsistencia o error se considera aceptable (Sipahi y Mehpare, 2010; Berumen y Lamazares 2007, Rozman y Pažek, 2005, Saaty, 2001).

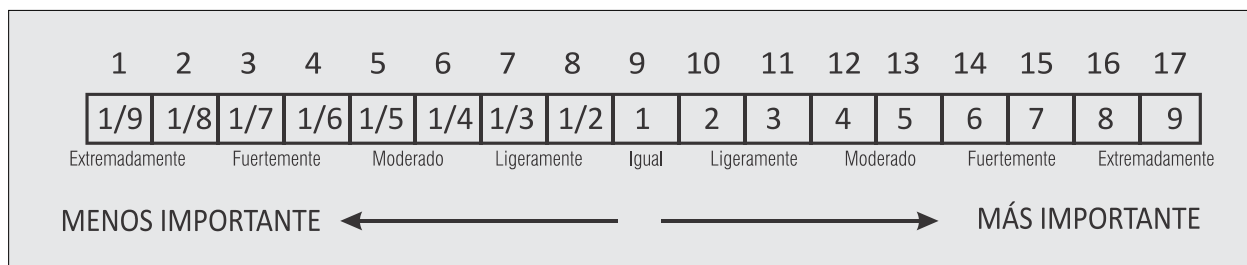


Figura 5. Escala de 17 jerarquías de importancia relativa para la construcción de la matriz de comparación entre pares de factores o variables decisión (Díaz y Blanco, 2000)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 4 se presenta la matriz de comparación y los pesos obtenidos de la evaluación con la técnica multicriterio aplicada a la zona cañera.

Tabla 4. Matriz de ponderación de variables

Variables	Clima	Índice de sequía	Lluvias	Temperatura	Tipo de suelo	Pendiente	Altitud
Clima	1	2	2	2	4	3	5
Índice de sequía	0,50	1	2	3	5	2	4
Lluvias	0,50	0,5	1	9	7	3	9
Temperatura	0,5	0,33	0,11	1	2	2	2
Tipo de suelo	0,25	0,20	0,14	0,5	1	2	2
Pendiente	0,33	0,5	0,33	0,5	0,5	1	2
Altitud	0,2	0,25	0,11	0,5	0,5	0,5	1

El análisis que surge de esta comparación generó que las variables precipitación, clima e índice de sequía, se consideran más relevantes para el desarrollo de la producción cañera en Huasteca, México; así se generan los «pesos» para cada factor a partir de una matriz de comparaciones por pares y determinar el impacto de estos factores en forma particular para esta región. El resultado se obtiene al resolver la matriz de la tabla 5 y el mapa de zonificación en la figura 6.

Tabla 5. Pesos de las variables de diversificación de ingenios azucareros (nivel de inconsistencia 0,05, aceptable por AHP)

Variables de aptitud al cultivo de caña de azúcar	Peso
Lluvias	0,379
Clima	0,205
Índice de sequía	0,173
Temperatura	0,082
Pendiente	0,066
Tipo de suelo	0,06
Altitud	0,036
Suma	1,000

El 75,7% del total de la aptitud es explicado por las variables climáticas como la precipitación con el mayor peso (37,9%), le siguen elementos del clima e índice de sequía seguido de las variables edafológicas: pendiente, tipo de suelo y altitud para condiciones de temporal contrario a lo reportado por Sánchez *et al.* (2002) para zonas cañeras sin restricciones climáticas o con disponibilidad de riego. En este sentido, Santé y Crecente (2005) concluyeron que la aptitud de la

tierra para usos agrícolas depende cada vez menos de los factores edafológicos. La mejora genética y la capacidad de mejorar las condiciones naturales de los suelos ha provocado que actualmente los factores más restrictivos para la implantación de un cultivo o aprovechamiento sean de carácter social, económico o político ya que Huasteca como área cañera, se caracteriza por estar compuesta de pequeñas superficies minifundistas (<3,0 ha por productor) que generan alta dispersión y variabilidad en el campo, lo cual dificulta el control de madurez y otras labores por el manejo agronómico diverso, retraso en la época de aplicación del fertilizante, y a la falta de renovación de las variedades de caña de azúcar en campo, es decir, además de las características climáticas tales como la lluvia, otros aspectos relacionados con las condiciones de la tierra como la topografía y que no se han registrado, se debe examinar la presencia de factores limitantes a fin de poder considerar las implicaciones que puede acarrear la adopción de ciertas prácticas agrícolas.

Por lo que este resultado puede, a mediano plazo, dirigir la planificación integral de una zona de interés mediante la determinación y diferenciación de ambientes productivos (tabla 6); debido a la homogeneidad en la toma de datos y a las posibilidades de procesamiento de la información obtenida, la que puede integrarse con otras fuentes provenientes de diversos campos de estudio (como el uso de índices de vegetación como NDVI, firmas espectrales y clasificaciones) para generar otros productos todavía más específicos y precisos de forma espacial. Si se tienen en cuenta la variabilidad de los factores productivos, tales como el ambiente donde se encuentra el cultivo, variedades, tipo de suelo, fertilidad, rendimientos históricos, etc., se puede hacer un manejo más eficiente del cultivo, permitiendo la aplicación de insumos de acuerdo a las necesidades y al potencial de los predios cañeros, es decir, como elementos determinantes de la aptitud y la inexistencia de modelos o sistemas adaptados a la zona. Esto tiene relación con autores como Murillo *et al.* (2010, 2009) que mencionaron que la interacción ingenio-zona agroecológica evidencia que el manejo agronómico, evolución y el efecto de las prácticas agronómicas tienen un peso considerable en la respuesta espectral del cultivo de la caña y por tanto en la productividad de acuerdo a sus valores medios de producción.

Tabla 6. Superficie cañera por aptitud

Aptitud potencial	Área (ha)	% Total
Alta (Mayor a 70 t ha ⁻¹)	43.767,7	49,09
Media (70 a 60 t ha ⁻¹)	11.795,6	13,23
Baja (60 a 50 t ha ⁻¹)	9.352,7	10,49
Muy baja (menor a t ha ⁻¹)	24.224,2	27,17
Total	89.158,0	100,00

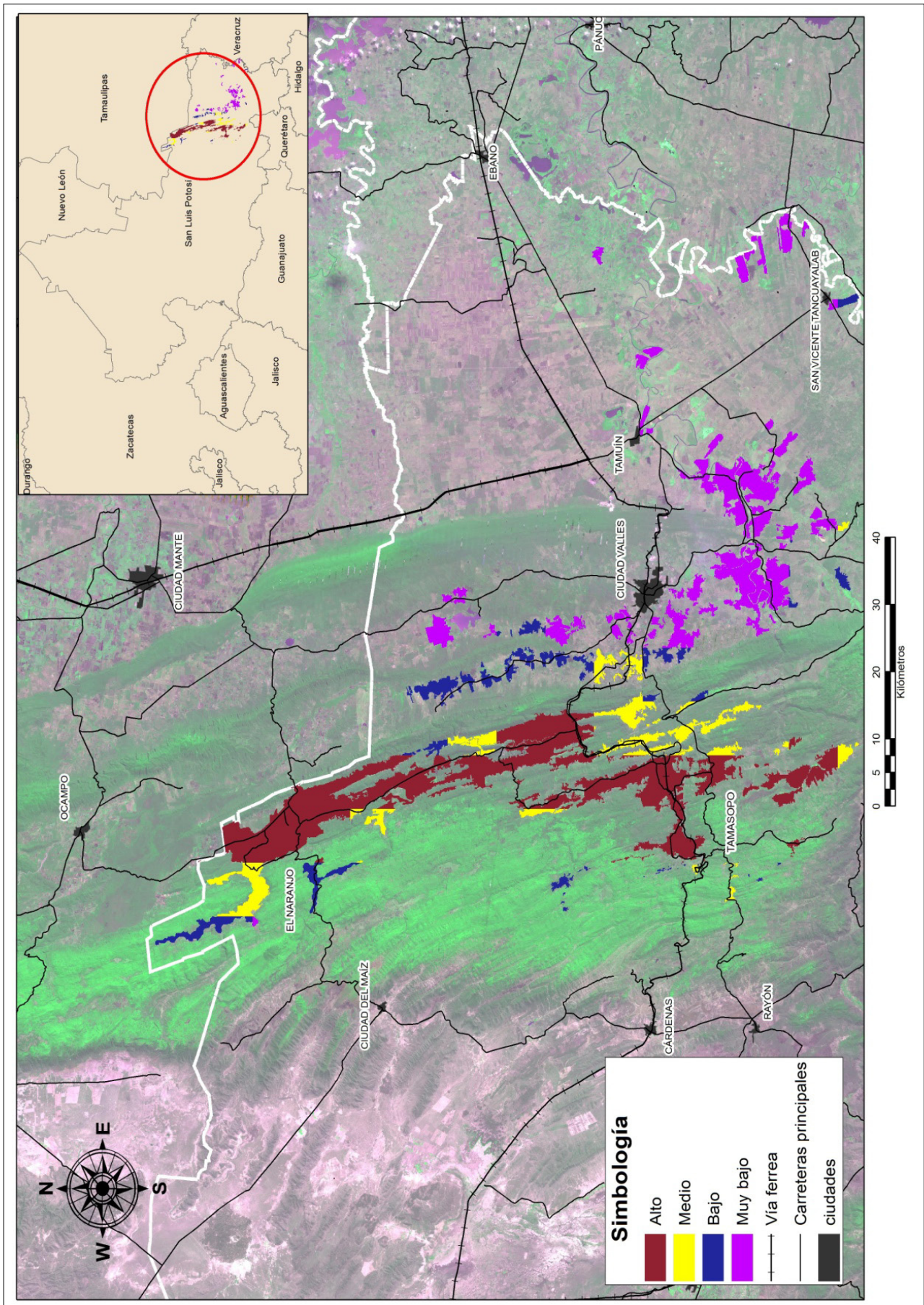


Figura 6. Distribución espacial de la superficie cañera de Huasteca (México) por aptitud al cultivo bajo condiciones de lluvias o secano

Dentro del mapa resultante se puede distinguir claramente las zonas con una alta probabilidad de obtener alto rendimiento de campo (TCH) y agroindustrial (TSH) debido a sus características edáficas y climáticas ya que permite una visión amplia y panorámica de las posibilidades de manejo del cultivo. No obstante, esta macrozonificación debe ser considerada como referencial para la planeación de actividades de manejo (variedades, riego, fertilización, mecanización, compactación de superficies, entre otros).

De la totalidad de la superficie cañera, la mayor distribución espacial presenta aptitud al cultivo de caña y se localiza principalmente en zonas de reciente incorporación (década de 1980 y 1990) al cultivo de caña en El Naranjo, Plan de San Luis y Tamasopo y el resto corresponde a zonas más antiguas en Tamasopo y Plan de Ayala (década de 1960 y anteriores al siglo XX), que se presentaban en forma de manchas discontinuas, cada una localizada alrededor de un polo o eje (ingenio azucarero) formando un patrón espacial donde se concentraron los productores. La región norte y centro de Huasteca son las áreas que registran el mayor incremento en su superficie dedicada al cultivo al convertirse en áreas de influencia o abasto de los ingenios es decir, comenzando desde los sectores de tierras fértiles de tradición agrícola y avanzando hacia los sectores más marginales para dicha explotación.

CONCLUSIONES

Dentro del mapa resultante, derivado de las metodologías empleadas, se puede distinguir claramente las zonas con una alta probabilidad de obtener buenos resultados agroindustriales debido a sus características edáficas y climáticas, ya que permite una visión amplia y panorámica de las posibilidades de manejo del cultivo. No obstante, esta

macrozonificación debe ser considerada como referencial para la planeación de actividades de manejo (variedades, riego, fertilización, mecanización, compactación de superficies, etc.) acotando la superficie sobre la cual se deben realizar estudios más intensivos, pudiendo ser replicada en otros escenarios y enriquecida a través de la inclusión de nuevos criterios y variables que se ajusten mejor a la realidad estudiada como el uso de índices de vegetación NDVI, firmas espectrales y clasificaciones digitales, para generar otros productos todavía más específicos y precisos de forma espacial a nivel predios cañeros. Si se tienen en cuenta la variabilidad de los factores productivos, tales como el ambiente donde se encuentra el cultivo, variedades, tipo de suelo, fertilidad, rendimientos históricos, etc., se puede hacer un manejo más eficiente del cultivo, permitiendo la aplicación de insumos de acuerdo a las necesidades y al potencial de los predios cañeros para eliminar problemas como el minifundio, ciclo resoca, inadecuado balance varietal, fertilización inoportuna, insuficiente frecuencia de riego o irracional uso de agua de riego, deficiencia de drenaje, menor número de días de zafra, desuso de resiembra, manejo y predicción de plagas, quema y requema, desuso de agroquímicos, inadecuada metodología para determinar madurez, daños a cepas durante cosecha y desuso de cosecha mecánica y así, como el incremento del rendimiento de campo de áreas de mayor productividad por arriba de 70 t ha⁻¹ de caña (renovación varietal, manejo de plagas, agricultura de precisión, etc.), diversificación de áreas de medio a bajo rendimiento con cultivos alternos y otras empresas derivadas del uso integral de la caña y reconversión de áreas cañeras de muy bajo rendimiento a otras actividades agropecuarias y en definitiva implementar la agricultura de precisión del cultivo de caña de azúcar en Huasteca para el beneficio de 12,910 unidades productivas y 12,567 productores y sus dependientes económicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Rahman EM, Ahmed FB. 2008. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) production: a review of the literature. *International Journal of Remote Sensing* 29(13):3753-3767.
- Giannotti MA. 2003. Geotecnologias na análise de impactos sócio-ambientais: o caso da queima de cana-de-açúcar na região de Piracicaba, (tesis de maestría), São José dos Campos, INPE. Piracicaba 180 p.
- Aguilar JL, Zulueta R. 1993. Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el estado de Veracruz. GEPLACEA, En: Simposio Nacional de Capacitación y Desarrollo Tecnológico del Campo Cañero Mexicano. Xalapa, México.
- Begue A, Degenne P, Pellegrino A, Todoroff P, Baillarin F. 2004. Application of remote sensing technology to monitor sugar cane cutting and planting in Guadeloupe (French West Indies). En: *Geomatica 2004 Conference*. La Habana, Cuba.
- Berumen SA, Llamazares R. 2007. Usefulness of multiple criteria decision methods (such as AHP) in an environment with growing competitiveness. *Cuadernos de Administración* 20(34):65-87.
- Castellanos EA, Van Westen CJ. 2007. Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides* 4:311-325.
- Cengicaña. 2004. Avances del proyecto de zonificación agroecológica en la zona cañera de Guatemala. En: Memoria, presentación de resultados de investigación Zafra 2003-2004. Guatemala. pp. 163-166.
- De Abreu LM, Granemann SR, Gartner IR, Bernardes RS. 2000. Escolha de um programa de controle da qualidade da água para consumo humano: aplicação do método AHP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4(2):257-262
- Díaz SJ, Blanco JL. 2000. Evaluación del potencial para acuicultura costera de camarón en el entorno de la laguna de Mar Muerto, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio con un SIG. *Investigaciones Geográficas, UNAM. Boletín del Instituto de Geografía* 41:62-80.
- Elmorea AJ, Xun S, Gorence NJ, Xia L, Haiming J, Wang F, Zhang X. 2008. Spatial distribution of agricultural residue from rice for potential biofuel production in China. *Biomass and Bioenergy* 32(1):22-27.
- Falconi F, Burbano R. 2004. Instrumentos económicos para la gestión ambiental: decisiones monocriteriales versus decisiones multicriteriales. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* 1:11-20.
- Freitas ALP, Marins CS, Souza DO. 2006. A metodologia de multicritério como ferramenta para a tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso. *Revista GEPROS* 2(3):52-60.
- Galdos MV. 2010. Simulation of sugarcane residue decomposition and aboveground growth. *Plant Soil* 326:243-259.
- Galindo MG, Contreras C, Olvera SL. 2009. Metodología para determinar zonas de peligro al ataque de la langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons* Walker) apoyados en sensores de alta resolución y SIG. Estudio de caso la Huasteca México. Conceptos de geomática y estudios de caso en México. Serie Libros de Investigación No. 5, México DF.
- Gomes H, Nunes R. 1999. Emprego do método de análise hierárquica (AHP) na seleção de variedades para o plantio de cana-de-açúcar. *Gestão & Produção* 6(3):243-256.
- Gómez M., Barredo JL. 2005. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. 2a ed. Editorial Ra-Ma, Madrid. 279 p.
- Hatfield JL, Gitelson AA, Schepers JS, Walthall CL. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal* 100:S117-S131.
- Krishna Rao PV, Venkataratnam L, Venkateswara Rao V. 1999. Remote sensing approach for acreage estimation of sugarcane crop in part of Kirishna district Andhra Pradesh. *Proc STAI* 61:79-87.
- Ji-Hua M, Bing-fang W. 2008. Study on the crop condition monitoring methods with remote sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37(B8):945-950.
- Jiménez A, Vargas V, Salinas WE, Aguirre MJ, Rodríguez D. 2004. Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Boletín Investigaciones Geográficas* 53:58-74.
- Johnson RM, Viator RP, Veremis JC, Richard Jr EP, Zimba PV. 2008. Discrimination of sugarcane varieties with pigment profiles and high resolution, hyperspectral leaf reflectance data. *Journal Association Sugar Cane Technologists* 28:63-75.
- Malczewski J. 1996. A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making. *International Journal of Geographical Information Systems* 10(8):955-971.
- Marin FR, Carvalho GL, Assad ED. 2009. Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006. En: XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. UFV. Viçosa, Brasil.
- Marin FR, Lopes-Assad ML, Assad ED, Vian CE, Santos MC. 2008. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 43:1449-1455.
- Medina G, Ruiz JA, Martínez RA, Ortiz V. 1997. Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. *Agricultura Técnica en México* 23(1):69-90.
- Mena C, Gajardo J, Ormazábal Y. 2006. Modelación espacial mediante geomática y evaluación multicriterio para la ordenación territorial. *Revista de la Facultad de Ingeniería* 14(1):81-89.
- Moore PH. 2009. Sugarcane biology, yield, and potential for improvement. Workshop BIOEN on Sugarcane Improvement. En: Workshop BIOEN on Sugarcane Improvement. San Pablo, Brasil.
- Murillo SPJ, Osorio MC, Carbonell J, Palma AE. 2009. Estimación temprana de producción de caña de azúcar a partir de imágenes satelitales MODIS. En: Resúmenes VIII Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar. Tecnicaña. Cali Colombia. pp. 356-364.
- Murillo PJ, Osorio CA, Carbonell JA, Palma AE. 2010. Monitoring sugarcane crops in the Cauca river valley (Colombia), using MODIS satellite images. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technology* 27:1-5.
- O'Leary GJ. 1999. A review of tree sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. *Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association* 73:33-34.
- Quintero JA, Montoya MI, Sánchez OJ, Giraldo OH, Cardona CA. 2010. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a Colombian case. *Energy* 33(3):385-399.
- Rozman C, Pažek K. 2005. Application of computer supported multi-criteria decision models in agriculture. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 70(4):127-134.
- Rudorff BFT, de Aguiar DA, da Silva WF, Sugawara LM, Adami M, Moreira AM. 2010. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. *Remote Sensing* 2:1058-1076.
- Ruiz JA, Valdez LE, González A, Soltero L, Ramírez JL, González C, Medina G, Flores HE, Regalado JR, Chávez JR, Díaz P, Santiago C, del Toro FM. 2005. Potencial productivo agrícola de la región costa norte de Jalisco. Libro Técnico No. 4. INIFAP-CIRPAC-C.E. Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos. 225 p.

- Salgado-García S, Palma-López DJ, Zavala J, Lagunes-Espinoza LC, Ortiz-García CF, Castelán-Estrada M, Guerrero-Peña A, Aranda-Ibáñez EM, Moreno Cáliz E, Rincón-Ramírez JA. 2010. Lotificación del campo cañero: una metodología para iniciar la agricultura de precisión en ingenios de México. *Interciencia* 35(3):183-190.
- Salgado-García S, Palma-López DJ, Zavala-Cruz J, Lagunes-Espinoza LC, Castelán-Estrada M, Ortiz-García CF, Juárez-López JF, Rincón-Ramírez JA, Hernández-Nataren E. 2008. Programa sustentable de fertilización para el ingenio Pujiltic, Chiapas, México. *Terra Latinoamericana* 26(4):361-373.
- Santé I, Crecente R. 2005. Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* 5:40-68.
- Saaty TL. 2001. Deriving the AHP 1-9 scale from first principles. *Proceedings 6th ISAHP*. Berna, Suiza.
- Sánchez P, Ortiz CA, Gutiérrez MC, Gómez JD. 2002. Clasificación campesina de tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz. *Terra* 20(4):359-369.
- Scarpari MS, Beauclair EGF. 2004. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. *Scientia Agricola* 61(5):486-491.
- Sipahi S, Mehpare T. 2010. The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. *Management Decision* 48(5):775-808.
- Subiros F. 2000. El cultivo de caña de azúcar. EUNED. San José, Costa Rica. 448 p.